

5
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN

“PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DE TIPO
ELÉCTRICO APLICADO A LA INGENIERÍA
CIVIL”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

RUBÉN CALVA DE LA FUENTE

ASESOR: ING. TOMÁS HERNÁNDEZ CASTILLO

MÉXICO

1998

266453



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ARAGÓN-UNAM
JEFATURA DEL ÁREA
DE INGENIERÍA CIVIL
ENAR/JAIC/0309/98.

Asunto: Asignación de jurado.

LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS
JEFE DE LA UNIDAD-ACADÉMICA
P R E S E N T E

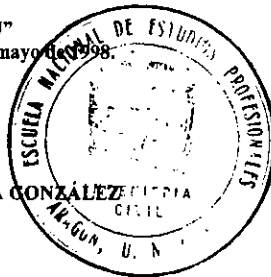
Por medio de la presente me permito relacionar los nombres de los profesores que sugiero integren el Sínoo del Examen Profesional de el alumno: RUBÉN CALVA DE LA FUENTE, con el tema de tesis: "PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DE TIPO ELÉCTRICO APLICADO A LA INGENIERÍA CIVIL".

PRESIDENTE	ING. RODRÍGO MURILLO FERNÁNDEZ	15-04-74
VOCAL	ING. TOMÁS HERNÁNDEZ CASTILLO	16-10-78
SECRETARIO	ING. IGNACIO E. HERNÁNDEZ QUINTO	16-11-85
SUPLENTE	ING. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA	16-10-87
SUPLENTE	ING. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GLEZ.	30-05-89

Quiero subrayar que el director de tesis es el ING. TOMÁS HERNÁNDEZ CASTILLO, el cual está incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, Edo. de Méx., a 29 de mayo de 1998.
EL JEFE DEL ÁREA

ING. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GONZÁLEZ



- c.c.p. LIC. MA. TERESA LUNA SÁNCHEZ, Jefe del Departamento de Servicios Escolares.
- ING. MA. DE LOS ANGELES SÁNCHEZ CAMPOS, Secretaria Técnica del Área de Ingeniería Civil.
 - ING. TOMÁS HERNÁNDEZ CASTILLO, Asesor de Tesis.
 - Comité de Tesis.

Interesado.
GGSG*onc.

AGRADECIMIENTOS

Sra. Alicia de la Fuente Colín (en memoria)

Bastantes momentos somos capaces de aprovechar en vida con quien tenemos estrechos lazos de amistad y afecto, sin embargo, en algunos de ellos resulta inevitable mantenerlos, la muerte es uno de ellos. Aquí esta presente uno de los logros que me hubiera gustado compartir junto a ti, puesto que fuiste la base más importante para que yo afrontara esta gran carrera que es la vida. Siempre llevare presente tu gran valor, cariño y dedicación brindados, te lo agradezco.

Lic. Saúl de la Fuente Colín

Durante la niñez observamos a las personas que nos rodean no como alguien que se esfuerza en ofrecer los elementos necesarios para nuestro desarrollo, sino como alguien que llena de entusiasmo nuestro mundo. Más tarde, entendemos que existen individuos con la capacidad de cordura y abnegación para apoyarte moralmente en la toma de decisiones clave de nuestra vida. Este trabajo indirectamente lleva parte de ese gran esfuerzo.

*Ing. Gabriel Alvarez Bautista
Ing. Tomás Hernández Castillo
Ing. Ignacio E. Hernández Quinto
Ing. Gilberto García Santamaría González
Ing. Rodrigo Murillo Fernández*

Muy respetuosamente agradezco las atenciones y apoyo brindados para que el presente trabajo tuviera éxito.

*CP. Armando Calva Amador
Lic. Sandra Elizabeth Calva de la Fuente
Verónica Margarita Calva de la Fuente
Octavio Calva de la Fuente
Carmen Guisselle Calva de la Fuente
Irian Yair Rubalcava Calva
María del Socorro Gatica Jacinto
Familiares y Amigos*

A quien dedico y agradezco su noble apoyo y confianza brindados.

CAPITULADO

INTRODUCCIÓN.....	5
CAPITULO I PREÁMBULO	
1.1 ORIGEN DE LA GEOFÍSICA.....	6
1.2 QUÉ ES GEOFÍSICA.....	6
1.3 DIVISIÓN DE LA GEOFÍSICA.....	7
1.4 GEOFÍSICA EN EL MUNDO.....	9
1.5 GEOFÍSICA EN MÉXICO.....	9
CAPITULO II SUELOS Y ROCAS	
2.1 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE SUELOS Y ROCAS.....	10
2.2 MINERALES FORMADORES DE ROCAS.....	10
2.3 ROCAS ÍGNEAS.....	15
2.4 ROCAS SEDIMENTARIAS.....	18
2.5 ROCAS METAMÓRFICAS.....	25
2.6 DEPÓSITOS SUPERFICIALES.....	28
2.7 SUELOS.....	31
CAPITULO III MÉTODOS GEOFÍSICOS	
3.1 MÉTODO SÍSMICO.....	33
3.1.1 SÍSMICO DE REFLEXIÓN.....	34
3.1.2 SÍSMICO DE REFRACCIÓN.....	34
3.1.3 UPHOLE Y CROSSHOLE.....	37
3.2 MÉTODOS ELÉCTRICOS.....	37
3.2.1 MÉTODO DE MAPAS DE POTENCIAL.....	38
3.2.2 MÉTODO DE RELACIÓN DE CAÍDAS DE POTENCIAL.....	39
3.2.3 MÉTODO DE RESISTIVIDAD.....	39
3.2.4 MÉTODO DE POLARIZACIÓN ESPONTANEA.....	42
3.2.5 MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA.....	43
3.3 MÉTODO TERMOMÉTRICO.....	43
3.4 MÉTODO GRAVIMETRICO.....	44
3.5 MÉTODO POR MAGNETOMETRIA.....	44
3.6 MÉTODO DE TRAZADORES NUCLEARES.....	45
3.7 MÉTODO DEL REGISTRO GEOFISICO EN POZOS.....	45
3.7.1 REGISTROS CONVENCIONALES.....	46
3.7.2 REGISTROS RADIATIVOS O RADIOMETRIA.....	48
3.8 PERCEPCIÓN REMOTA.....	50

**CAPITULO IV CONDICIONES DE APLICABILIDAD DE LOS
DIFERENTES MÉTODOS**

4.1 MÉTODOS DIRECTOS E INDIRECTOS.....	51
4.2 CAMPOS DE PARTICIPACIÓN DE TRABAJOS GEOFÍSICOS.....	51
4.3 CLASIFICACIÓN DE LOS METODOS GEOFISICOS EN GEOTECNIA.....	55
4.4 IMPORTANCIA DE LAS MEDICIONES SOBRE LOS RESULTADOS.....	55

CAPITULO V TEORÍA PARA EL MÉTODO DE TIPO ELÉCTRICO

5.1 PRINCIPIOS DE ELECTRICIDAD.....	58
1.1 CARGA ELÉCTRICA.....	58
1.2 AISLADORES Y CONDUCTORES.....	59
1.3 LEY DE COULOMB.....	59
1.4 CAMPO ELÉCTRICO.....	60
1.5 LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO.....	61
1.6 ENERGÍA POTENCIAL.....	63
1.7 POTENCIAL.....	63
1.8 DIFERENCIA DE POTENCIAL.....	64
1.9 CAPACITANCIA.....	64
1.10 CORRIENTE.....	65
1.11 LEY DE OHM.....	66
5.2 TEORÍA PARA EL MÉTODO ELÉCTRICO.....	66
2.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	66
2.2 ACTIVIDAD ELECTROQUIMICA.....	71
2.3 CONSTANTE DIELECTRICA.....	72
2.4 POLARIZABILIDAD.....	72
5.3 PRINCIPIOS PARA LOS DIFERENTES TIPOS ELÉTRICOS.....	73
3.1 MÉTODO DE AUTOPOTENCIAL.....	73
3.2 MÉTODO DE LAS LÍNEAS EQUIPOTENCIALES.....	75
3.3 MÉTODO POR RESISTIVIDAD.....	78
3.4 SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL.....	81
5.4 DISPOSICIONES Y PROCEDIMIENTO DE CAMPO.....	88
4.1 DISPOSICIÓN WENNER.....	88
4.2 DISPOSICIÓN DE LEE.....	88
4.3 DISPOSICIÓN TRIELECTRODO.....	88
4.4 DISPOSICIÓN SCHLUMBERGER.....	89
5.5 INTERPRETACIÓN.....	89
5.1 MEDIOS ESTRATIFICADOS CON SUPERFICIES DE SEPARACIÓN HORIZONTAL.....	90
5.2 INSTRUMENTOS.....	92

INTRODUCCIÓN

Durante el curso de Problemas de Geotecnia que se imparte en la Carrera de Ingeniería Civil, pude darme cuenta de la necesidad de hacer uso de otras áreas del conocimiento que coadyuvan a la obtención de información técnica, necesaria para el desempeño de los trabajos de campo y gabinete de la ingeniería. Tal es el caso de la Geofísica Aplicada como herramienta de auxilio en la Ingeniería Civil.

Bajo este contexto, el siguiente trabajo pretende abordar el tema de la Prospección Geofísica; en primera, tratando las partes que integran a esta rama de la ciencia desde un esquema global y resumido, en seguida, tratar de mostrar qué parte de esta área es de nuestro interés, en qué consisten sus diferentes modalidades, las bondades que brindan este tipo de estudios, y de entre todas ellas, a cuál enfocaremos nuestro estudio y análisis en especial.

El empleo de la Geofísica engloba, muchas de las veces, los conocimientos de campo de la Geología mediante un vínculo intrínseco, para resolver problemas referidos esencialmente al comportamiento de la tierra, pero con la particularidad de inclinarse a la parte práctica, que en primera instancia, es lo que interesa al ingeniero. Por ello, existe la necesidad de vincular tres áreas de trabajo: la Geofísica, la Geología y la Ingeniería Civil, de tal forma que se puedan aprovechar todos los elementos que cada una ofrece y utilizarlos para resolver problemas específicos que se presentan en nuestro campo de trabajo.

Este trabajo tiene la particularidad de enfocar su estudio a uno de los métodos geofísicos más utilizados en el campo de la Ingeniería Civil: el de tipo eléctrico, en el cual se profundizan varios aspectos como son sus diferentes tipos, aspectos teóricos que lo sustentan, las diferentes formas de uso, además de algunas recomendaciones que garanticen un mejor aprovechamiento del mismo.

Como aplicación real, se muestra un proyecto tipo en donde se conforma todo un estudio detallado, que refleja la participación interdisciplinaria entre las áreas antes mencionadas, haciendo, por supuesto, un énfasis en el uso de la Prospección, como campo que engloba los resultados para tal fin. El proyecto que se detalla en el Capítulo VII consiste en la construcción de una casa habitación, con la peculiaridad que será construida en una zona donde se presume existen minas subterráneas y la finalidad en sí, es de localizar dichas oquedades mediante el método eléctrico y posteriormente, dar una solución ingenieril adecuada para tal caso.

CAPITULO I

PREÁMBULO

1.3 ORIGEN DE LA GEOFÍSICA

La aplicación de la Física al estudio de nuestro planeta no es una ciencia moderna, sino que se remonta su origen hasta los comienzos de la ciencia experimental.

Sin embargo la unión de las palabras Física y Geología para designar una nueva rama del saber tuvo lugar en 1853, apareciendo por primera vez la palabra *Geophysik*, en un léxico publicado en Alemania.

Treinta y cinco años mas tarde esta palabra paso al inglés en un comentario o revista de geología. Luego a las demás lenguas y al español vino con el nombre de *Geofísica*. Los franceses han preferido llamarla *Physique du Globe*.

La primera publicación dedicada exclusivamente al estudio de la Física de la Tierra fue Gerlands Beiträge zur Geophysic, revista alemana iniciada en 1887. El Dr. Gerland muestra en el prefacio al primer volumen de la relación de la Geofísica con otras ramas del saber, y recalca el hecho de que no hay apenas rama de la ciencia de la tierra que no tenga su relación con la Geofísica.

De aquí resulta que, empezando por los tiempos primitivos de nuestro planeta, son problemas geofísicos: su origen e historia, la determinación de su edad, y los cambios sufridos, sus movimientos presentes, su masa, su forma, su composición, temperatura y presión interior, etc.

La Geofísica es aliada de la Geología, especialmente cuando la geofísica investiga la deformación de la corteza terrestre, la formación de montañas, el desplazamiento de los continentes, el vulcanismo, las mareas del mar y tierra, etc.

Los estudios geofísicos se enfocaron más tarde hacia los problemas de distribución de la masa de la tierra, del comportamiento sísmico de la corteza terrestre y del núcleo central, de los campos gravitacionales, magnéticos y eléctricos de la tierra.

Así se vino a distinguir la Geofísica Pura de la Geofísica Aplicada, y surgieron los métodos físicos para determinar las estructuras de las formaciones geológicas en la corteza terrestre, con el fin de hacerlas económicamente útiles al hombre.

1.2 QUÉ ES GEOFÍSICA

Etimológicamente, Geofísica significa: naturaleza de la tierra. En su sentido mas propio, es el estudio de los fenómenos de la naturaleza que se refieren a la tierra, especialmente a sus propiedades físicas, estructura y composición.

La tierra comprende aquí la litosfera o tierra sólida, la hidrosfera o envoltura del agua, y la atmósfera o cobertura gaseosa.

El hecho mismo de que un fenómeno físico se produzca sobre la tierra, no quiere decir que se a un problema geofísico; se necesita que ese fenómeno sea influenciado por la

misma tierra (gravedad, campo eléctrico o magnético terrestre, elasticidad o radiactividad de las rocas).

1.3 DIVISIÓN DE LA GEOFÍSICA

Como puede apreciarse, la Geofísica es una ciencia compleja cuyas numerosas ramas suelen agruparse bajo dos grandes títulos: Geofísica Pura y Geofísica Aplicada.

Como Geofísica Pura encontramos:

- ◆ **Meteorología.**- Es el estudio científico de los fenómenos físicos que ocurren en la atmósfera, y de los fenómenos relacionados a la litósfera y a la hidrósfera. Estudia las causas del tiempo, condiciones climáticas y sus cambios. Se dedica a observar, prever el tiempo y anunciarlo, a estudiar las propiedades físicas, composición y estructura de la atmósfera en general, radiación y temperatura, presión atmosférica, viento precipitación, visibilidad.
- ◆ **Magnetismo y Electricidad Terrestre.**- Es la ciencia que trata de los fenómenos eléctricos y magnéticos de la tierra y de la atmósfera: radio comunicaciones y propiedades eléctricas y magnéticas de la alta atmósfera, rayos cósmicos, corrientes eléctricas naturales de la tierra, resistencia terrestre.
- ◆ **Oceanografía.**- Es el estudio dinámico y estático de los océanos que cubren tres quintas partes de la superficie del globo. Se interesa por investigar la influencia que ejercen los océanos sobre el clima y la vegetación, los actuales procesos de sedimentación para interpretar los del pasado, la configuración del fondo de los mares, la acción de las olas, de las mareas, las corrientes marinas y los procesos físicos y químicos, especialmente los relacionados con la vida de los peces.
- ◆ **Geodesia.**- Es el estudio de las medidas de la superficie terrestre en gran escala, especialmente aquellas que tienden a determinar la forma y tamaño de la tierra por medio de triangulación, nivelación y gravimetría. En su ámbito abarca la cartografía y la fotogrametría, las variaciones de latitud, deflexiones de la vertical y las mareas.
- ◆ **Sismología.**- Es la investigación de los terremotos naturales y artificiales. Se esfuerza por conocer la naturaleza de la transmisión de las ondas vibratorias a través de la tierra, la constitución interna de la misma, la estructura de las capas superficiales, la exploración sísmica.
- ◆ **Vulcanología.**- Es la ciencia de los volcanes y de los fenómenos relacionados, examina las rocas volcánicas e intrusivas relacionados con el proceso de formación.
- ◆ **Hidrología.**- Trata de la distribución, comportamiento y disposición de las lluvias sobre la tierra sólida. Enfoca su estudio hacia los fenómenos de infiltración, evaporación, escurrimiento, dinámica de los ríos, hidráulica de transporte y depósitos de sedimentos de ríos, lagos, glaciares, nieve y hielo.

- ◆ **Tecnofísica.**- Coordina la aplicación de los métodos físicos y de los datos químicos y geofísicos a la estructura de la tierra por medio de experimentos de laboratorio y de observaciones geológicas.

Bajo la tutela de la Geofísica Aplicada se agrupan aquellas de mayor aplicación económica y comercial:

- ◆ La Aerología Aeronáutica
- ◆ La Óptica Atmosférica
- ◆ La Radio Transmisión de la Atmósfera
- ◆ Cartografía Hidrográfica
- ◆ Predicción de Mareas
- ◆ Sondeos Acústicos Marinos
- ◆ Prospección Geofísica

Como puede observarse, la prospección geofísica no es lo mismo que la Geofísica, los métodos geofísicos determinan "efectos físicos", no nuevos depósitos o estratos; de esta forma, si habláramos del método sísmico (el cual se hablará más adelante), no tiene nada que ver con los depósitos, mide el tiempo que gastan las ondas en recorrer distancias a través de las rocas, y encuentra estructuras favorables para la acumulación de petróleo o estratos, por ejemplo.

La prospección geofísica constituye un campo pequeño de la Geofísica, y como tal marcha a colocarse al lado de la Ingeniería Civil, Mecánica, Eléctrica y Geológica. No obstante su juventud, la prospección geofísica se ha abierto camino en el campo de las ciencias aplicadas y contemplan hoy horizontes que se amplían continuamente.

1.4 LA GEOFÍSICA EN EL MUNDO

La Geofísica comienza aplicarse en Geotecnia después de la Segunda Guerra Mundial, hacia los años 50 la falta de recursos económicos de los países involucrados hace imperativo el desarrollo de tal tecnología.

Los técnicos y los científicos de cada país investigaron diversas tecnologías y el esfuerzo conjunto se vió coronado en el año 1964 por el Octavo Congreso Internacional de Grandes Presas, celebrado en la ciudad de Edimburgo, Escocia. En las memorias

correspondientes se indica el avance que había alcanzado la Geofísica en sus aplicaciones en la Geotecnia.

Le sigue el Primer Congreso Internacional de Mecánica de Rocas, que tuvo lugar en la ciudad de Lisboa, Portugal, en el año de 1966. Dichas ponencias, permitieron difundir y actualizar el estado del conocimiento que se había alcanzado en 1964.

La posibilidad en la evolución de dichos estudios se debe al intenso y acelerado desarrollo que tuvieron las industrias aerospaciales y nucleares.

1.5 LA GEOFÍSICA EN MÉXICO

En lo que respecta a México, las primeras aplicaciones empezaron en 1966, a través de la Dirección General de Proyectos y Laboratorios de la Secretaría de Obras Publicas. El ejemplo fué seguido meses después por la Comisión Federal de Electricidad y la Secretaría de Recursos Hidráulicos. Viendo que era factible la aplicación de tal metodología, se creó en el año de 1970, la carrera de Ingeniero Geofísico, tanto en la Universidad Nacional Autónoma de México, como en el Instituto Politécnico Nacional; en el año de 1975 empezaron a salir los primeros egresados de la carrera.

De hoy hasta hace aproximadamente 40 años, se destinaba la Geofísica al estudio de reconocimiento de minerales (hierro, petróleo, etc.). Prácticamente no servía para resolver los problemas planteados en Ingeniería Civil, no es, sino hasta el año de 1970 cuando se comienzan a ver los primeros resultados. De esta época hasta hoy, el desarrollo de la técnica permite el empleo de la Geofísica en obras de ingeniería. Actualmente es una herramienta de gran interés en su utilización como método indirecto, en el cual se puede conocer el subsuelo de una futura obra.

El conocimiento de las características mecánicas, estáticas y dinámicas de las rocas y de los suelos *in situ*, así como de su comportamiento, han llegado a constituir actualmente una necesidad ineludible para el Ingeniero proyectista a fin de poder dar los valores adecuados para cada obra de Ingeniería Civil que se construye sobre dichos elementos

CAPITULO II

SUELOS Y ROCAS

2.1 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE SUELOS Y ROCAS

En el área de Ingeniería Civil el estudio del suelo es una actividad inherente, por ello es fundamental que el conocimiento que se tenga acerca de éste y de los factores que interactúan sobre el mismo sean cada vez más claros y precisos.

Haciendo un breve examen del suelo, revela que se compone de materiales blandos y duros, mejor conocidos como suelos y rocas, respectivamente, en ocasiones unidos o separados.

Las ciencias que estudian estos materiales se llaman Mecánica de Suelos y Mecánica de Rocas, estas han centrado sus esfuerzos en el estudio principalmente de la resistencia mecánica del material, propiedades índice y otras características, sin embargo, existe también la necesidad de entender el tipo y la estructura de dichos materiales, con lo cual es indispensable conocer los procesos geológicos básicos.

Ante esto se crea una nueva ciencia llamada Geotecnia, en ella se aplican la Mecánica de Suelos, la Mecánica de Rocas y la Geología. En general estudia las rocas y los suelos que guardan relación con los procesos geológicos, analizándose especialmente las propiedades asociadas a su comportamiento, por un lado, bajo presión mecánica y por otro ante las acciones químicas que actúan en la superficie terrestre, las cuales producen la desintegración de la roca sólida y la convierten en suelo. Además se puede predecir el comportamiento del suelo cuando se construye sobre este.

Precisamente en este capítulo se tiene la intención de presentar brevemente las nociones básicas con respecto a los suelos y las rocas tomando en cuenta la geología.

2.2 MINERALES FORMADORES DE ROCAS

El término mineral se define como una sustancia de origen natural y composición química definida, que se encuentra en la superficie o en la corteza terrestre. En Geología el uso de esta palabra abarca todas las sustancias formadas por procesos naturales, que constituyen las rocas, esta última puede estar compuesta por uno o varios tipos de mineral.

Existen alrededor de 2000 minerales conocidos, pero sólo nueve de ellos participan en forma importante en la composición de las rocas; estos son Cuarzo, Feldespato, Mica, Hornblenda, Augita, Olivino, Calcita, Caolinita y Dolomita.

Mineral	Estructura	
Olivino	Grupos aislados de SiO_4	SiO_4
Piroxenos (Augita)	Cadenas simples	Si_2O_6
Anfíbolos (Hornblenda)	Cadenas dobles	Si_4O_{11}
Micas	Láminas	Si_4O_{10}
Feldespatos	Reticulada	$(\text{Al},\text{Si})_n\text{O}_{2n}$
Cuarzo	Reticulada	SiO_2
Arcillas (Caolinita)	Capas	$\text{SiO}_5 / \text{X}(\text{OH})_6$
Carbonatos (Calcita)	Romboédrica	XCO_3

X = un posible elemento

Estos se deben estudiar desde el punto de vista de la inestabilidad química y mecánica, por lo que la resistencia de una masa de roca depende de estas propiedades

Los minerales tienen una estructura interna definida, compuesta por la combinación en grupos de átomos, este arreglo tiene un efecto importante sobre la resistencia mecánica de los minerales de las rocas, por ejemplo, cuando la estructura es laminar se rompe con facilidad, otras tienen una estructura interna que solo les permite romperse en forma irregular. Las cargas con exceso de iones se equilibran con cationes de otros elementos formadores de rocas. La composición química de algunos minerales es variable, debido a que determinados elementos pueden ser sustituidos por otros en la estructura.

Muchos de los minerales más comunes se pueden identificar en ejemplares de mano por sus propiedades físicas.

Entre las características usuales para este propósito están :

- 1) Dureza,
- 2) Peso específico,
- 3) raspadura,
- 4) La forma, es decir, cristalina, clivaje, fractura, etc.,
- 5) su reacción ante la luz, según lo indican el lustre y la transparencia.

Las rocas cuyo cementante es el cuarzo (SiO_2) son las más resistentes, seguidos por aquellas cuyo cementante es la calcita y los minerales ferromagnesianos. Los menos resistentes son las arcillosas. Más del 90% de los minerales que forman las rocas son silicatos ión(SiO_4). Entre los minerales con silicato encontramos: los ferromagnesianos (con iones de hierro y magnesio), y los no-ferromagnesianos (no contienen hierro y magnesio). Al contrario de los ferromagnesianos cuyo color es oscuro y su peso alto, los no-ferromagnesianos son claros y ligeros.

Olivino

Olivino $(Mg, Fe)_2SiO_4$. El magnesio y el hierro son intercambiables en la celda unitaria. Es de color verde claro, pero más oscuro con mayor contenido de hierro. Peso Esp. Rel. 3.2 a 3.6. Se encuentra en rocas básicas y ultrabásicas. Se descompone con facilidad.

Piroxenos

Ortopiroxeno $(Mg, Fe)_2Si_2O_6$: Estatita cuando contiene Magnesio e Hiperestatita cuando contiene Hierro; Piroxeno Monoclínico (Augita) $(Ca, Mg, Fe, Al)_2O_6$. Esta es la forma común del Piroxeno que se encuentra en rocas ígneas básicas y ultrabásicas. El color verde oscuro da a estas rocas un tono gris oscuro.

Anfibolas

La hornblenda es el tipo común $(Ca, Mg, Fe, Na, Al)_{3-4} (Al, Si)_4O_{11}(OH)$. Es inestable. De color verde. Los cristales son alargados y en las rocas metamórficas con frecuencia se observan alineados.

Micas

Muscovita: $KAl_2 [(Si_3Al)O_{10}](OH)_2$. Peso Esp. Rel. 2.9. Incolora. Mineral hexagonal de forma plana. Refleja la luz principalmente cuando se encuentra en arena. Biotita: $K (Mg, Fe)_3 [(Si_3Al)O_{10}](OH)_2$. Peso Esp. Rel. 2.8 a 3.1, café oscuro a negro. Las micas son comunes en esquistos y granos de mica. La biotita es menos estable que la muscovita y no es un mineral de rocas sedimentarias.

Feldespatos

Los feldespatos constituyen alrededor del 54% de los minerales de la corteza terrestre. Hay tres clases principales: albita $NaAlSi_3O_8$; ortoclasa $KAlSi_3O_8$ y anortita $Al_2Si_2O_8$. Peso Esp. Rel. 2.56 a 2.76. La mezcla de albita y anortita forman la plagioclasa, constituye aproximadamente el 50% de la mayor parte de las rocas básicas como el basalto y la dolerita.

Cuarzo

Es un mineral duro y químicamente resistente. Es el principal constituyente de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas ricas en cuarzo se denominan silíceas. Peso Esp. Rel. 2.65. El cuarzo se observa con frecuencia en vetas de color blanco, contenido en las rocas como material detrítico, por ejemplo las areniscas. Una roca que este compuesta casi por completo de cuarzo se llama cuarcita.

Minerales Arcillosos

Se forman en capas sobrepuestas. 1) Capas que son del tipo tetraédrico SiO_4 que se originan como múltiplos de SiO_2 o $\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$. 2) Se presentan en forma de octaedro que consta de un ión metálico (aluminio o magnesio) dentro de un grupo de seis hidróxilos (OH) acomodados en las esquinas de un octaedro. Estas capas se pueden acomodar de dos maneras: unidades de dos capas (caolinita compuesta de capas alternadas de silicio y aluminio), o en unidades de tres capas (montmorilonita). Peso Esp. Rel. 2.6 a 2.9

Los minerales arcillosos tienen la propiedad de ensancharse cuando se humedecen y se contraen cuando están secos. Tales arcillas pueden causar problemas en los cimientos de una construcción. Otros minerales arcillosos pueden intercambiar cationes en su estructura y se les puede utilizar para la extracción de la cal de los abastecimientos de agua. Las propiedades mecánicas de las arcillas pueden ser muy variables. Los tipos más importantes son: caolinita, haloisita, illita, smectita (grupo de la montmorilonita), vermiculita y glauconita.

Carbonatos

La calcita es el principal mineral en calizas, en donde se encuentra mezclado con arcilla. La calcita reacciona con ácido clorhídrico diluido, produciendo burbujas de CO_2 . Peso Esp. Rel. 2.8 a 2.9. Siderita (FeCO_3) se le puede encontrar en combinación con arcilla (arcilla ferruginosa). Peso Esp. Rel. 3.7 a 3.9.

Clorita

Clorita $(\text{Mg, Al, Fe})_{12}(\text{Si, Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$. Es un mineral verde, laminar como las micas y relacionado con las mismas. Peso Esp. Rel. 2.65 a 3.00. La clorita es común en pizarras, esquistos, vetas hidrotermales y como mineral de descomposición de rocas ígneas básicas.

Yeso

Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Blanco y cristalino; abunda en depósitos de arcilla de climas áridos y se encuentra disperso en la arcilla o en finas capas dentro de la formación arcillosa. La anhidrita es CaSO_4 y no tiene agua en su estructura cristalina. Ambos son utilizados en la industria de la construcción.

PROCESO DE FORMACIÓN DE LAS ROCAS

Tres procesos distintos intervienen en la formación de rocas a partir del conjunto de los minerales formadores de rocas reunidos en diferentes proporciones. Se les conoce como procesos de formación: ígnea, sedimentaria y metamórfica. Ver figura 2.1

PROCESO DE FORMACIÓN DELAS ROCAS

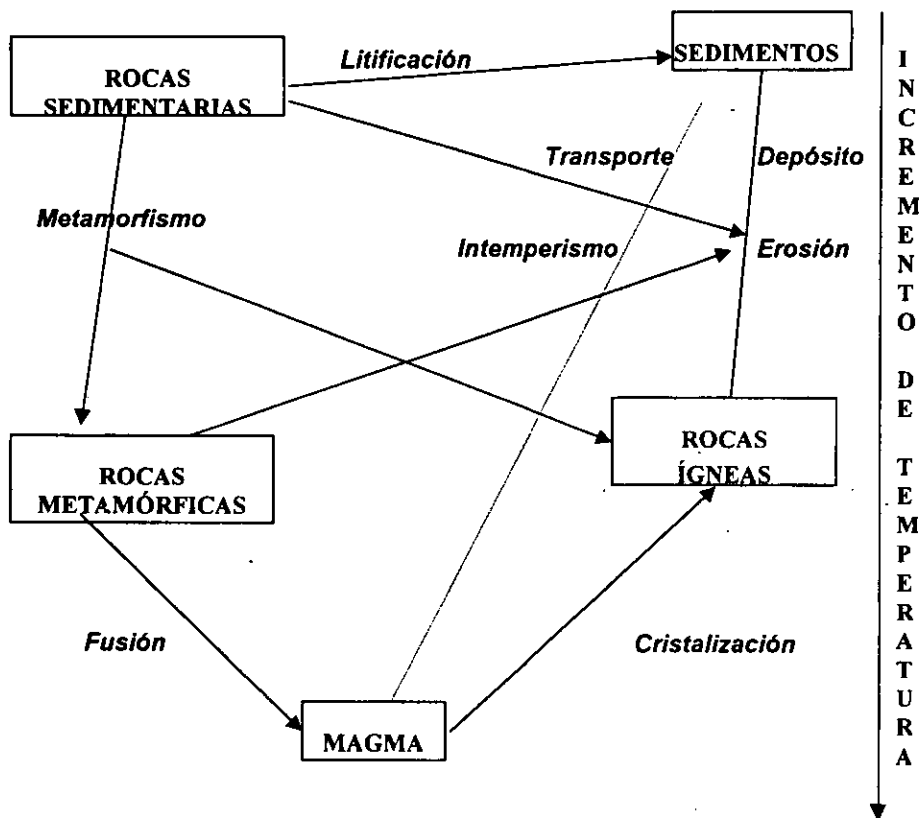


FIG. 2.1

2.3 ROCAS ÍGNEAS

Las rocas ígneas se forman por la cristalización o enfriamiento del material fundido de silicatos en la corteza o bien en la superficie terrestre, arrojado allí por una erupción volcánica. El nombre se denomina de la palabra latina fuego, debido a que los volcanes activos parecen arder, aunque este efecto se debe a rocas incandescentes a temperaturas de aproximadamente 2000°C y no por la combustión. Esta roca fundida se conoce como magma; se forma en el interior de la corteza y en el manto superior por los mismos procesos que causan el levantamiento de la corteza y la formación de cadenas montañosas. La roca fundida puede penetrar a regiones donde se están formando montañas y, al enfriarse y cristalizarse, construir su basamento de roca ígnea sólida. Este proceso genera la formación de grandes masas de roca ígnea de cientos de miles de kilómetros de longitud.

Magma	Fe, Mg	Básicas (oscuras)
	SiO ₂ , Al, K, N	Ácidos (claras)

ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS (enfriamiento rápido, grano fino)
 INTERMEDIAS
 INTRUSIVAS (enfriamiento lento, grano grueso)

2.3.1 TEXTURA DE LAS ROCAS ÍGNEAS

1. Textura Piroclástica: Esta se caracteriza por contener granos o minerales de diferentes tamaños, esto varía desde unas micras hasta los tres o cuatro metros de diámetro. Tobas, lapillis, arenas, cenizas volcánicas.

2. Textura Vítreo: Esta se caracteriza por presentar una apariencia de vidrio. Obsidiana, perlita, piedra pez.

3. Textura Afanítica: Esta se caracteriza por presentar granos o minerales tan pequeños que no se pueden identificar a simple vista, o bien con la ayuda de una lente de mano. Basalto, andesitas y algunas reolitas.

4. Textura Fanerítica o granular: Formada por granos o minerales que pueden ser observables e identificados a simple vista o con una lente de mano. Por lo general los granos o minerales presentan un mismo tamaño (equigranulares). Granitos, granodioritas.

5. Textura Porfírica: Es una mezcla de la textura afanítica y de la fanerítica, es decir, se presentan granos o minerales de mayor tamaño. Pórfidos.

En la figura 2.2 se muestra la composición y clasificación de las rocas ígneas.

TIPOS DE ROCAS ÍGNEAS

GRANITO

El granito es una roca ígnea ácida de grano grueso compuesta por otros minerales: cuarzo (10 a 25%), feldespato (60 a 80%), mica (2 a 5%).

Los feldespatos son principalmente del tipo Na-K , ortoclasa y perita pero por lo general hay cierta cantidad de plagioclasa, el feldespato de Na-Ca.

Si hay más plagioclasa y menos feldespato de Na-K la roca se clasifica como granodiorita. Con menos cuarzo, en cuyo caso la roca se compone casi por completo de feldespato, hay una transición a sienita. La mica del granito puede ser incolora, pero brillante muscovita o la biotita de color café oscuro o negro. La turmalina es por lo general de color azul oscuro y se presenta en racimos de cristales de forma acicular o en vetas.

Las características que interesan al ingeniero son: estado de caolinización y la distribución, así como la frecuencia y la orientación de fracturas. El grado de intemperismo del granito entre 5 y 10 m de profundidad puede ser elevado y en consecuencia, no se deben levantar ahí cimientos para grandes construcciones o estructuras. Su parte superior intemperizada se compone de fragmentos residuales de roca en proceso de descomposición, mezclados con cuarzo y feldespato en forma de arena, así como arcilla, que por lo general es de color café debido a la presencia de compuestos de hierro.

En climas templados y húmedos la roca madre puede estar a unos cuantos metros bajo la superficie, pero esta profundidad puede ser variable. En climas tropicales el espesor del depósito superficial de laterita puede ser tan grueso que los cimientos para construcciones se deben diseñar como si estuvieran en una base de arcilla, pues el costo de excavación hasta alcanzar la roca madre sería muy alto.

Habitualmente se considera al granito una roca muy dura, y por esta característica se emplea en bloques de construcción y como agregado en el concreto.

DIORITA

La diorita es una roca ígnea intermedia de grano grueso, compuesta principalmente de feldespato blanco, feldespato Na-K y plagioclasa, así como hornblenda, que es un mineral ferromagnésico de color verde. El contenido de cuarzo puede alcanzar hasta 10%. Es un tipo de roca de transición entre el granito ácido y la dolerita básica; se convierte a dolerita cuando tiene mayor cantidad de calcio, Mg o Fe, también se encuentra en forma de augita y hornblenda. Cuando contiene mayor cantidad de Na, K y SiO₂ la roca varía de granodiorita a granito.

ANDESITA

Tiene la misma composición química que la diorita, pero es de grano fino y puede contener algunos cristales nitidos y rectangulares de plagioclasa de más de 3 mm de largo.

OBSIDIANA Y RETINITA

Son rocas ígneas de grano fino, solidificadas inmediatamente después de una erupción. Ambas son parecidas al vidrio, de color oscuro u opaco, muy duras y quebradizas.

GABRO, DOLERITA Y BASALTO

Estas rocas pertenecen al grupo denominado básico, por el alto contenido de magnesio, calcio o sodio en su composición química, en comparación con las rocas ígneas ácidas. Dichas rocas tienen mayor cantidad de hierro que las ácidas y este elemento contenido en los minerales silicatados denominados ferromagnésicos, el que da el color verde a las rocas, aproximadamente la composición mineral está constituida por los ferromagnésicos, olivino, piroxeno (augita) y hornblenda; la otra mitad es el feldespato

plagioclasa, el feldespato de Na-K puede estar presente, y el cuarzo si no hay olivino en la roca. Los óxidos de hierro y titanio, por lo común, son componentes secundarios, se encuentran en un porcentaje del 2 al 3%. De esto se desprende que hay muchas variedades: gabro de olivino, dolerita de olivino, dolerita de cuarzo, etc. En Estados Unidos la dolerita es diabasa.

FIGURA 2.3

CLASIFICACIÓN MINEROLÓGICA Y TEXTUAL DE LAS ROCAS IGNEAS

EMPLAZAMIENTO COMUN	TEXTURAS TÍPICAS	CUARZO + FELDESPATOS	FELDESPATO POTÁSICO > PLAGIOCLASA SODICA	PLAGIOCLASA SODICA	PLAGIOCLASA CALCICA
Capas uniformes e irregulares	Piroclástica	Aglomerado, riolítica	Toba, brecha sienítica	o Ceniza Andesítica	Basáltica
Derrames superficiales	Hialina	Vidrios Obsidiana, Perlit	Acidos Pomez, Retinita	Vidrios Intermedios Escoria	Vidrios Básicos Taquilita
Derrames superficiales	afanítica o merocristalina	Riolita	Traquita	Andesita	Basalto
Diques	Porfídica	Porfido riolítico	Porfido Traquitico	Pórfido Andesítico	Diabasa
Diques	Equigranular Alotriomórfica	Aplita	Aplita Sienítica	Aplita Diorítica	Aplita Gabróica
Masas irregulares, etc.	Fanerítica (Pegamatítica)	Pegmatita Granítica	Pegmatita Sianítica	Pegmatita Dioritic	Pegmatita Gabróica
Batolitos, lacolitos, etc	Fanerítica y hipidomórfica	Granito	Sienita	Diorita	Gabro

Estas rocas son duras y difíciles de excavar, requiere del uso de dinamita (explosivos). En ocasiones se puede esperar que durante la excavación se encuentren lentes de basalto muy intemperizado.

Las rocas piroclásticas están compuestas por rocas volcánicas constituidas por partículas sólidas o fragmentos que han sido lanzados al aire a diferencia de las que permanecieron como masa líquida hasta cristalizar. Las tobas y aglomerados pertenecen a este grupo.

En la figura 2.3 se muestra la clasificación mineralógica y textura de las rocas ígneas.

2.4 ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias se forman bajo el agua, en mares, lagos y en depósitos de arena y polvo transportados por el viento. Cuando se forman bajo el agua, estos sedimentos tienen cantidades variables de dos componentes:

1. Detritus, el producto de erosión transportado al mar por los ríos, este material se compone principalmente de cuarzo, arcilla, mica y fragmentos de roca;
2. Minerales precipitados a partir de soluciones en el agua, primordialmente carbonatos de calcio y magnesio, sulfuros y óxidos e hidróxidos de hierro y sílice en forma de cuarzo.

Los sedimentos se depositan hundiéndose lentamente en cuencas sedimentarias, que son áreas de aguas someras de la superficie terrestre. Los sedimentos también se acumulan en las zonas más profundas del océano y en las cuencas adyacentes a algunas partes de los continentes. Por regla general, el material de grano más grueso se acumula en zonas cercanas a tierra y, el grano más fino, más hacia el interior del mar. El agua salada de los estuarios provoca la floculación de la arcilla suspendida en aguas fluviales y se deposita como lodo en los depósitos de estuario.

Las rocas sedimentarias comunes incluyen capas de arcilla, lodo, arena y grava que cuando se convierten en rocas duras, después de rellenar los espacios vacíos con material cementante, forman lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados, respectivamente. En la figura 2.4 se muestra el proceso de formación de las rocas sedimentarias

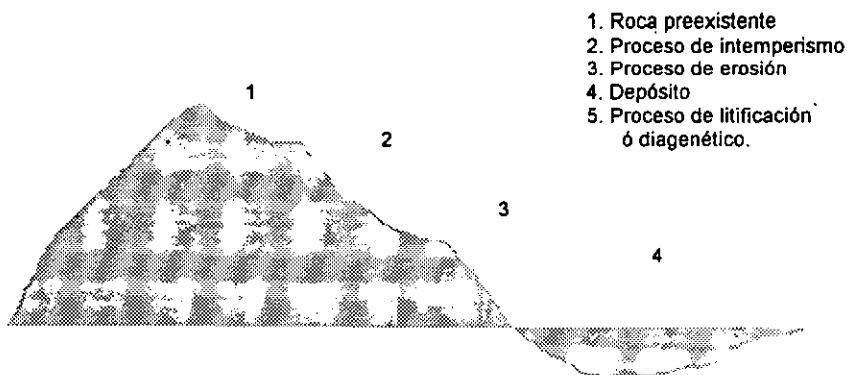


Figura 2.4

	ORIGEN MECÁNICO	} Detrítica - clásticas
ROCAS SEDIMENTARIAS	ORIGEN QUÍMICO	
	ORIGEN ORGÁNICO	} Bioquímico - no clásticas

◆ **Proceso de Intemperismo.** Se refiere a los cambios que tienen lugar en los minerales y rocas en y cerca de la superficie de la tierra, por efecto de el agua, el sol, el viento, la acción de las plantas y animales, y los cambios de temperatura. El intemperismo puede ser mecánico o químico.

-Intemperismo Mecánico: Se le conoce también como desintegración, en este proceso las rocas o minerales se rompen en fragmentos cada vez más pequeños como resultado de la energía desarrollada por las fuerzas físicas.

-Intemperismo Químico: Se le conoce en ocasiones como descomposición, en este proceso se altera la composición del mineral o roca transformando el material total o parcialmente en su estructura interna. Principalmente el agua reacciona con diferentes minerales.

◆ **Proceso de Erosión:** Se refiere a la remoción o desgaste de suelo y partículas de roca originados por el viento, hielo y ríos.

◆ **Proceso de Litificación:** Los procesos de litificación convierten a los materiales sin consolidar, que forman rocas en roca consolidada coherente:

-Cementación: En la cementación los espacios vacíos entre las partículas individuales de un depósito sin consolidar se rellenan con algún agente que los liga. Son agentes cementantes: la calcita, la dolomita, el cuarzo, etc.

-Compacción y desecación: En un depósito clástico de grano fino, con partículas de tamaño de limo y arcilla, los espacios porosos son generalmente tan pequeños que el agua no puede circular libremente a través de ellos; por esta razón se considera muy poco material cementante que se abre entre las partículas. En la compacción el espacio poroso entre los granos individuales se reduce gradualmente por la presión de los sedimentos superyacentes o por presiones resultantes de movimientos de la tierra. En la desecación, el agua que originalmente llenaba los espacios porosos es obligada a salir de los depósitos de arcilla y limo asentados.

-Cristalización: La cristalización de ciertos depósitos químicos es en si misma una forma de litificación. La cristalización sirve para endurecer los depósitos asentados por procesos mecánicos de sedimentación.

La mayoría de las rocas sedimentarias se encuentran en una forma estratificada.

TIPOS DE ROCAS SEDIMENTARIAS

ROCAS SALINAS

Se forman de sales disueltas que se precipitan en aguas que desembocan en lagos o mares interiores de climas áridos. Cuando la entrada de agua que contiene las sales disueltas es igual al grado de evaporación hay un proceso continuo de precipitación y, por lo tanto, se forman grandes depósitos salinos (evaporitas). La halita es cloruro de sodio (NaCl) o sal de cocina. La anhidrita (CaSO_4) y el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) son sulfatos empleados en la industria química y de la construcción. Hay otras variedades de rocas salinas; todas se componen de minerales en forma de carbonatos, sulfatos, cloruros y boratos.

SILEX Y PEDERNAL

Son variedades hidratadas de sílice (SiO_2), que se forman bajo el agua. El pedernal se encuentra en la creta en capas delgadas que no alcanzan 10cm de espesor; el sílex se encuentra en todas las formaciones sedimentarias de todas las edades remontándose hasta el Precámbrico.

Ambas rocas son muy duras y no las raya el acero (prueba para su identificación); son poco resistentes a las fuerzas de choque. Es similar al vidrio cuando se le golpea con martillo y se rompe en cuñas o astillas muy filosas. El pedernal es de color gris a gris oscuro cuando está fresco, pero bajo la acción del intemperismo se torna café claro o casi blanco; el sílex es con frecuencia de color café oscuro hasta casi alcanzar el negro.

Gracias a su dureza, estas rocas resisten el intemperismo y la erosión, y forman depósitos de grava y arena de grano grueso en valles fluviales y a lo largo de costas. Cuando las capas de sílex son gruesas se utilizan explosivos para su extracción; por ser una roca dura, frágil e inflexible, el sílex presenta por lo común muchas fracturas, especialmente cuando la formación de la roca ha sido sometida a un plegamiento.

CARBÓN

El carbón forma depósitos en capas que reciben el nombre de mantos, interstratificados con pizarras arcillosas y areniscas que se encuentran en formaciones del carbonífero superior. Este material se formó inicialmente en un gran depósito de turba, una masa de restos de plantas preservadas de la descomposición, por haberse acumulado en cuencas en descenso de la corteza terrestre, en condiciones de estancamiento y ambiente químico reductor.

CONGLOMERADO Y BRECHA

Son dos variedades de rocas sedimentarias de grano grueso. Se componen de fragmentos (guijarros) cementados por material de grano fino como arcilla, lodo, arena, cuarzo, óxido de hierro (rojo) e hidróxido de hierro (café). El nombre de estas rocas depende de la forma de los gujarros: los redondeados se presentan en los conglomerados y los angulosos en las brechas.

En la figura 2.5 se muestra el origen de formación de las rocas sedimentarias.

FIGURA 2.5 ROCAS SEDIMENTARIAS			
ORIGEN	AGENTE TRANSPORTADOR	SEDIMENTO SUELTO	SEDIMENTO CONSOLIDADO
M E C Á N I C O	AGUA	GRAVA (aristas Redondeadas) GRAVA (Aristas agudas) ARENA LIMO ARCILLA	CONGLOMERADO BRECHA ARENISCA LIMONITA ARGILITA
	VIENTO	MEDANOS LOESS	ARENISCA
	HIELO	GRAVAS ANGULOSAS ARENA LIMO ARCILLA	TILITA
ORIGEN	NATURALEZA	SEDIMENTO CONSOLIDADO	
Q U Í M I C O	CALCAREA Cacarea Arcillosa	CALIZA DOLOMITA ARAGONITA TRAVERTINO MARGA	
	SILICOSA	PEDERNAL GEYSERITA	
	SALINA	EVAPORITAS	SAL GEMA YESO BORAX TREQUESQUITE CRISTALILLO
O R G Á N I C O	CALCAREA	CALIZA CORAL COQUINA CRETA (Sascab)	
	SILICOSA	DIATOMITA (Tizar)	
	CARBONOSA	TURBA LIGNITO HULLA ANTRACITA	

Estas rocas se forman por la acción de la erosión y la sedimentación. La roca fragmentada por intemperismo es transportada por el agua, los bloques se reducen a fragmentos, estos últimos se convierten en arena, durante el proceso todas las partes del

material se redondean; pero si el material se depositó rápidamente en gruesas capas, sin pasar por periodos prolongados de trituración permanecen angulosos y forman la brecha. Si hay un proceso largo de rodamiento y trituración se forman capas de conglomerado.

Hay una secuencia continua de grava sin consolidar hasta conglomerado duro, este grado de consolidación es de importancia en ingeniería, al determinar el grado de resistencia de la roca, así como la permeabilidad. La porosidad de la roca puede ser alta, así como su contenido de agua, en cuyo caso será un acuífero. La porosidad varía con frecuencia tanto en sentido horizontal como vertical de una capa a otra, habiendo cambios en las condiciones de agua subterránea durante las excavaciones y los cortes.

ARENISCA

La arenisca es una forma endurecida de la arena. Se compone de granos de cuarzo, mica y fragmentos de grano fino cuyo tamaño varía de $60\mu\text{m}$ a 2mm , cementados por otros minerales; la eficiencia del proceso cementante varía de una a otra parte de la roca, de tal manera que la porosidad de ésta no es igual a todas sus partes. El material cementante es, por lo general cuarzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), óxidos e hidróxidos de hierro y la arcilla. Los granos de detritus varían poco desde la arena hasta el limo (4 a $60\mu\text{m}$) y arcilla (menos de $4\mu\text{m}$). El resultado de esto es que las areniscas varían en sus propiedades mecánicas, porosidad y color, dependiendo de cómo se hayan originado, y pueden existir desde areniscas sin consolidar hasta la arenisca sólida, prácticamente sin espacios vacíos.

Con la disminución del tamaño del grano, la roca se convierte a limolita y si hay más del 15% de arcilla, se denomina arenisca arcillosa.

Las variaciones de la porosidad de roca causadas por el grado de cementación son de importancia para el ingeniero. Las areniscas porosas son buenos acuíferos, pero su rendimiento de agua puede variar bastante según su grado de porosidad. Estos factores influyen en la cantidad de agua subterránea del lugar de construcción. Los cambios en la porosidad también afectan la resistencia de la roca y la estabilidad de las pendientes donde se hayan hecho cortes.

FANGOLITA

Es un sedimento de grano fino que originalmente fue una capa de lodo en un lago o en un mar. La roca se compone de las partículas de arcilla, carbón de grano fino y sulfuros de hierro. Los dos últimos determinan el color de la fangolita, que puede ser casi negro.

La fangolita es impermeable por ser de grano fino y sus capas que separan las rocas permeables pueden impedir el movimiento del agua subterránea; entonces, el agua se concentra en el límite de la fangolita y puede causar dificultades en las excavaciones y provocar desprendimientos de rocas y, en general, problemas en los frentes de los escarpes y los acantilados costeros.

La argilita es una variedad de la fangolita, compuesta principalmente de arcilla muy comprimida y cementada por otros minerales, pero no tiene la estructura fisible de la roca arcillosa.

PIZARRA ARCILLOSA

La pizarra arcillosa se formó de un sedimento de grano fino constituido por arcilla; a veces calcita y compuestos de hierro que le dan su color. La pizarra arcillosa se forma en el limo o lodo de los lagos y ríos, donde la ausencia de corrientes de agua permiten la espesa acumulación de los sedimentos de grano fino (con menos de 4 μ m de tamaño).

La ausencia de oxígeno en el agua estancada provoca la precipitación del sulfuro de hierro, el cual da un color negro al lodo. En aguas bien oxigenadas se formará un lodo de color más claro. El limo se puede transformar en dos variedades diferentes de roca: pizarra arcillosa y fangolita, se piensa que en la pizarra arcillosa los minerales de arcilla y los cristales de mica muy finos se orientan paralelamente a los planos de estratificación, por lo que la roca se rompe con facilidad, la microestructura de la fangolita no muestra esa alineación de los minerales, rompiéndose en forma irregular y no en determinada dirección.

Si la calcita se precipita in situ, el sedimento se convertirá en una caliza que puede contener cantidades muy variables de arcilla en su composición. Las capas alteradas de pizarra arcillosa y caliza son conjuntos muy comunes de rocas sedimentarias; son de gran importancia en geotecnia y, con frecuencia causan problemas en las rocas.

Cuando la pizarra arcillosa esta seca tiende a ser impermeable y el agua que fluye a través de rocas más impermeables, como las areniscas o las calizas fracturadas, encuentran una barrera y tienden a concentrarse en el límite entre los dos tipos de roca. En climas húmedos las pizarras arcillosas pierden esta tendencia y pueden identificarse fácilmente por un suelo lodoso y, a veces, por el surgimiento de manantiales que brotan del mismo.

La pizarra arcillosa se descompone y erosiona con mayor rapidez que las rocas duras, como las calizas y areniscas con las cuales se le encuentra a menudo.

Tiene algunas ventajas cuando esta presente en la construcción, entre ellas permite que se corte y excave con facilidad sin necesidad de explosivos; pero, también altera el flujo del agua tanto subterráneo como superficial aflorando en el terreno de construcción. En ocasiones la pizarra esta constituida por una roca sólida debajo de una capa superficial intemperizada por lo que es apropiada para cimentaciones. Debido a la tendencia de la pizarra arcillosa a la intemperización y a convertirse rápidamente en lodo, es necesario protegerla de la lluvia, sobre todo si es en una excavación, ya que las capas de pizarra situadas entre capas de caliza provocan deslizamientos y provoca que se desplomen las paredes. El grado de echado de las capas es un factor determinante bajo estas circunstancias.

ARCILLA Y MARGAS

Son rocas sedimentarias no consolidadas, de grano fino que se encuentran originalmente en forma de lodo depositado en el fondo de lagos o el mar, perdiendo agua gradualmente a medida que el peso del sedimento se acumula en esta zona al secarse se compactan, pero no en el mismo grado que lo hacen las pizarras arcillosas y las fangolitas.

Las margas son una mezcla de arcilla con una pequeña cantidad de carbonatos o sulfatos.

La arcilla generalmente es un sedimento de grano fino que contiene minerales como el sílice, ya sea en estado coloidal o como lodo muy fino, además están presentes el carbón, la mica, sulfuros, óxidos e hidróxidos de hierro dando muy variadas tonalidades. Si aumenta la proporción de grano grueso, la arcilla se convierte en limo; ver la parte correspondiente a suelos.

Cuando la arcilla se expone a excavaciones, túneles y cortes presenta una alineación bien marcada de fracturas.

La arcilla húmeda causa con frecuencia problemas durante la construcción si no se mantiene seca.

CALIZA

Es una roca sedimentaria muy importante, tiene numerosos usos, especialmente en la industria de la construcción, por lo general, es dura, compacta, pero con frecuencia causa problemas.

La caliza esta compuesta por CaCO_3 (calcita) y una cantidad menor de otros minerales como arcilla, cuarzo, dolomita, sulfuros u óxidos de hierro, carbón, asfalto y con frecuencia microfósiles o restos marinos, dichos restos son un elemento clave para determinar la edad de algunas calizas. Gracias a estos minerales existen muchas variedades de éstas rocas: la caliza argilica (calcilutita) tiene un alto contenido de arcilla; la caliza arenacea (calcarenita) contiene detritus de cuarzo; la caliza de conchas (fossilífera) contiene abundantes conchas de animales marinos; la caliza dolomítica tiene cristales de dolomita encajados en la calcita; y la caliza oolítica u oolita.

Muchas calizas son blancas cuando no ha actuado en ellas el intemperismo; las calizas oscuras deben su color a hidrocarburos o sulfuros de hierro existentes en su composición, pero intemperizadas son por lo común de color blanco debido al crecimiento de capas de sulfato de calcio (yeso), especialmente en zonas donde los ácidos de la atmósfera aceleran el proceso.

La caliza se disuelve con gran facilidad, de modo que el agua de lluvia que cae sobre la misma se filtra rápidamente hacia abajo de la superficie donde abre canales de solución, cavidades y cavernas, las cuales son agrandadas por la acción del agua subterránea.

Durante la construcción se presentan problemas debido a que los canales que se forman debajo de la superficie son de tamaño, forma y distribución irregulares, éstos no se localizan en forma fácil durante el levantamiento y su localización no es definitiva, por ello, durante las excavaciones las cavidades encontradas deben ser rellenadas con lo cual aumentan los costos de operación; las cavidades pueden encontrarse justo debajo de una autopista, las cuales aparecen sin ser detectadas hasta que ocurre el colapso. Ver las figuras 2.6, 2.7 y 2.8.

2.5 ROCAS METAMÓRFICAS

El término metamorfismo se restringe a los cambios en la textura y composición que sufren las rocas sólidas. El metamorfismo puede producirse solamente cuando la roca esta sólida.

Las rocas metamórficas se forman a partir de otras clases de roca por la acción del calor y la presión, por separado o actuando en forma simultánea. La composición química de la roca no se altera durante el proceso de metamorfismo, pero los elementos se vuelven a combinar de manera distinta para formar nuevos minerales y, a menudo, al aplicar presiones muy altas a la roca, ésta reduce su volumen.

Existen dos grupos de rocas metamórficas:

1. Las foliadas que se caracterizan por que los minerales no se distribuyen al azar, sino presentan determinada orientación y algunas veces se separan en grupos de diferentes clases, formando bandas contrastantes.
2. Las masivas o no foliadas, con una textura en donde los minerales están orientados al azar, a diferencia de las rocas conformadas por presiones cortantes por haber sido sometidas a campos de presión uniforme.

Las rocas metamórficas tienen una composición química y mineral similar a la de varias clases de rocas ígneas, pero los minerales están distribuidos según ciertos patrones que dan la clave para distinguirlas. A menudo la roca tiene vetas bien marcadas que en cierta forma determinan las propiedades mecánicas de la masa rocosa.

El clivaje es el término utilizado para describir la relativa facilidad de romper una roca o un mineral a lo largo de planos paralelos. En las rocas de textura granular, los granos individuales son claramente visibles, pero no es evidente la presencia del clivaje de la roca, caso particular se muestra en las rocas metamórficas con textura foliada.

TEXTURA DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS

- ◆ Textura Pizarrosa: Esta textura se manifiesta por presentar un clivaje a lo largo de planos separados por distancias de dimensiones microscópicas.
- ◆ Textura Filítica: En esta el clivaje produce láminas apenas visibles a simple vista. El clivaje filítico produce hojuelas más gruesas que el apizarrado. Siempre presenta un lustre jabonoso.
- ◆ Textura Exquistosa: En este clivaje, produce láminas claramente visibles ; las superficies del clivaje exquistoso son más rugosas que las del apizarrado y filítico.
- ◆ Textura Gnessica: Esta se caracteriza por presentar bandas alternas generalmente de unos cuantos milímetros de espesor de diferente composición mineral.
- ◆ Textura Cristalina Granular: Es una textura que presenta una apariencia cristalina que contiene a su vez algunos minerales o granos con apariencia aplastada o despedazada.

TIPOS DE ROCAS METAMÓRFICAS

GNEISS

El gneiss tiene una composición mineral similar a la del granito, por lo general, se compone de: cuarzo, feldespato, mica y hornblenda, pero. estos minerales no están distribuidos al azar como en el granito, sino que se agrupan en bandas de un solo tipo de minerales, en este caso su estructura es foliada.

MIGMATITA

Se forma por metamorfismo a partir de la mezcla de rocas de diferentes tipos de composición química, por ejemplo, las rocas ricas en sílice o rocas ácidas que se combinan con las rocas básicas ricas en Mg y Fe. En la formación de estas dos rocas interviene el agente calor a temperaturas que no alcanzan a fundirlas completamente ni a formar una mezcla homogénea, pero si provoca la recristalización de modo que forman bandas de minerales oscuros que provienen de los componentes básicos, hornblenda y biotita, alterando otras bandas que se componen básicamente de cuarzo, feldespato y de la mica muscovita, que proviene de un componente ácido. Esta roca es una forma de gneiss, pero el abanderamiento es más grueso y los tamaños de masas de un solo tipo de mineral pueden ser del orden de metros y no de centímetros, a diferencia del gneiss foliado.

ESQUISTO

El esquisto es una roca metamórfica que se compone de cristales planos de mica o de clorita verde, hornblenda de hábito y de otros minerales, por lo común cuarzo. El granate es un mineral común en algunas variedades de esquisto, se presenta en forma de pequeños cristales esféricos. Los cristales tubulados y tubulares del granate se alinean de tal manera que las rocas se rompen con facilidad en fragmentos planos o tubulares. La alineación de los minerales se presenta a una temperatura de hasta 700° C en un campo de esfuerzos marcadamente anisotrópico. Los minerales se ordenan con mayor facilidad en las direcciones de menor esfuerzo y la alineación resultante da como lugar a la formación de planos de menor resistencia; por lo tanto, esta roca es fisible, se parte dando formas definidas: planas, rectangulares o en forma de barra.

Los esquistos se forman a partir de rocas arcillosas, como pizarra, etc., de rocas ígneas graníticas y básicas. La arcilla pura se transforma en esquisto de mica, pero si hay impurezas como magnesio y hierro, en esta arcilla se formará granate. El esquisto de hornblenda se forma a partir del metamorfismo de pequeños trozos de roca ígnea básica como la dolerita y el basalto.

La composición mineral y la alineación del esquisto son características significativas para la ingeniería; puede variar en la existencia de una masa de roca debido a las diferentes clases de esquistos que se encuentran en su composición. Por lo tanto, los agregados de hornblenda se intemperizan con mayor rapidez que los de cuarzo y mica.

FILITA Y PIZARRA

Estas se componen principalmente de muscovita y clorita, con un poco de cuarzo. La clorita es un mineral de color verde, que tiene cristales laminares, similar a la de la mica, pero se forma a temperaturas menores (hasta los 400° C) en campos anisotrópicos de esfuerzo muy intenso. El material de la clorita también es rico en Mg y Fe, pero a diferencia de la mica, sus cristales no se forman en arcilla pura. De hecho, las condiciones en que se forman los diferentes tipos de pizarra y esquistos son muy similares; pero las pizarras se formaron a temperaturas menores, a ello se debe la existencia de cristales más pequeños, ya que posiblemente, pasaron por un proceso metamórfico de más breve duración, originándose que estas rocas sean de grano fino y puedan partirse fácilmente en fragmentos planos.

La filita o pizarra tegular es una variedad de rocas pizarrosas cuya textura se compone de cristales planos ovalados que dan a los planos de clivaje una textura característica. Los planos de clivaje paralelos de las pizarras se deben a la alta presión generada por la compactación de las sucesivas capas de sedimentos de grano fino. Estos planos están cruzados por fracturas que a menudo presentan un dibujo geométrico regular, ocasionando que la roca se rompa en formas romboédricas o rectangulares definidas.

La pizarra es una roca dura, resistente al intemperismo, por lo cual se destina para recubrir techos. La dirección de los patrones del crucero y de fracturamiento son los factores geotécnicos más importantes, ya que, estos factores determinan la forma en que el macizo rocoso se resquebrajará; así como la estabilidad de los frentes de roca durante los cortes y otras excavaciones; en estos últimos depende básicamente del ángulo formado por el sistema de crucero y de fracturamiento. Cuando se encuentra pizarra arcillosa, existe un proceso de transición gradual de suelo arcilloso a lecho rocoso que se efectúa mediante una serie de cambios continuos donde se evidencia una mayor cantidad de los fragmentos de pizarra y cantidades cada vez menores de arcilla. Habitualmente, se utilizan herramientas mecánicas en la excavación de la pizarra, pero si la excavación es profunda, será necesario el uso de explosivos.

FIGURA 2.10

CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS CON FÁBRICA FOLIADA

ROCA	CARACTERÍSTICAS
Gneis	Roca de grano grueso, foliación imperfecta, como resultado del bandeamiento de diferente minerales, la foliación provoca que se formen planos de debilidad lenticulares que se traducen en derrumbes en las excavaciones, los minerales principales son cuarzo y feldespato, pero son comunes otros como mica, anfíboles y otros ferromagnesianos. La clasificación gneis incluye al mineral accesorio dominante: gneis de hornblenda, gneis de biotita; o su composición general: gneis cuarzo-feldespático, gneis granítico.
Paragneis	Derivado de rocas sedimentarias
Ortogneis	Derivado de rocas ígneas feldespáticas.
Esquisto	Roca de grano fino, foliación bien desarrollada como resultado del arreglo paralelo de minerales aplastados (esquistosidad). Estos minerales son: micas, clorita y talco. El esquisto se identifica por el mineral primario: esquisto de mica, esquisto de clorita, etc. el granate es un mineral accesorio común, del esquisto de mica, y representa metamorfismo intenso. En ocasiones es difícil distinguir un esquisto de un gneis, porque gradúan uno a otro.
Anfibolita	Consiste principalmente en anfíboles y muestra una textura más o menos esquistosa. Se compone de minerales oscuros además de la hornblenda, y puede contener cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y mica. Es una roca dura, con densidad entre 3.0 y 3.4, se asocia con gneises y esquistos con los que forma macizos que son más resistentes a la erosión que otras rocas que los rodean.
Filita	Roca suave, con lustre satinado y esquistocidad, extremadamente fina. Se compone principalmente de clorita. Es muy inestable en taludes. Gradúa a esquisto a medida que el tamaño del grano aumenta.
Pizarra	Roca de grano extremadamente fino. Presenta olivaje plano. Generalmente se separa de la masa rocosa en planos duros.

2.6 DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Son todo el material no consolidado formado por los diversos procesos de intemperismo y erosión y que en la actualidad se acumulan en la superficie terrestre o en el fondo del mar. Estos depósitos difieren de los materiales no consolidados como las arcillas, los cuales se formaron con mucha anterioridad en la historia de la Tierra; los depósitos superficiales se pueden haber formado en cualquier tiempo en los últimos dos millones de años y son de origen relativamente reciente, muchos de éstos depósitos aun están en proceso de formación.

El material de la superficie puede ser producto de la intemperización de la roca que se encuentra debajo de la capa superficial, o tal vez, fue transportado desde algún otro lugar por el viento, el agua o por los glaciares.

En los levantamientos geológicos, por lo general, se consideran solo depósitos naturales, mientras que en un levantamiento geotécnico se debe indicar cualquier depósito hecho por el hombre, como los desperdicios o desechos que se tiran en una cantera abandonada u otras oquedades del terreno.

ALUVIÓN

Nombre genérico que comprende los depósitos de arcilla, limo, arena, grava y cantos rodados que se depositan en el fondo y a los lados de los valles fluviales. Este material es producto de los procesos de intemperismo, erosión y transporte de las rocas. El material aluvial es arrastrado muy lentamente hacia el mar. Cuando cambian las estaciones y aumentan las lluvias, los ríos fluyen con mayor rapidez, erosionan el aluvión, arrastrándolo río abajo hasta llegar al mar o a un lago. Si el clima se torna más seco el material tiende a acumularse en el valle e incrementa el espesor del depósito. Al correr una nivelación precisa a través del valle de un río, muestra que su perfil no sigue una curva suave, ni lineal sino escalonada. Las zonas planas que se encuentran a los lados se llaman terrazas o bancos.

La información que se necesita saber acerca de un depósito de aluvión abarca la profundidad a la cabecera de la roca que puede variar mucho, siendo generalmente mayor en el centro del valle, y el área superficial de los materiales clasificados de acuerdo con el tamaño de las partículas. Las muestras para análisis se obtienen mediante sondeos y se estudian en el laboratorio. El tamaño de las partículas determina las condiciones hidrológicas del valle; también se requiere de un levantamiento local sobre la profundidad del nivel freático, debajo del cual el material del valle está saturado de agua. El nivel freático asciende y desciende, conforme a los cambios del caudal del río. Por lo general, existe una gran cantidad de agua que fluye hacia el mar a través del aluvión, además de la que corre por la superficie, lo cual causa grandes problemas durante las excavaciones.

DEPÓSITOS GLACIALES

También conocidos como depósitos de transporte glacial, están formados por material erosionado y transportado en el hielo, en forma de glaciales (ríos de hielo) o como grandes casquetes que se extienden a partir de la base de las montañas, cubriendo grandes áreas de terrenos más bajos. El material fragmentado que transportan los glaciares se denomina morrena; estas pueden tener un espesor de decenas de metros y una extensión de cientos de kilómetros cuadrados. El material del extremo del glaciar que se funde es removido y seleccionado de acuerdo al tamaño de sus partículas por la acción de las corrientes de agua, formándose depósitos de grava, arena, limo y arcilla que reciben el nombre de varvas.

El ingeniero civil necesita distinguir básicamente dos grupos fundamentales de depósitos glaciales: aquél que se forma de la erosión de las rocas en zonas montañosas donde nacen los glaciares y aquellos depósitos cuya extensión y tamaño de partículas indica que se trata de material depositado al fundirse el glaciar.

La tilita es una arcilla glacial muy común e importante, cuyas partículas no han sido calibradas por la corriente del río. Esta compuesta por material que varía mucho de tamaño, desde arcilla hasta bloques de roca.

LATERITA

Este material se encuentra en la zona de rocas intemperizadas en las regiones tropicales de clima húmedo, donde abundan las lluvias cálidas y ligeramente ácidas, que

disuelven el sílice y otros minerales. Como producto de este proceso queda una mezcla de arcilla, hidróxido de aluminio y los compuestos de hierro que le imparten al depósito un color rojizo. La laterita es un buen material en la construcción y, a menudo, se emplea para pavimentar caminos, donde forma una superficie firme e impermeable, si se ha compactado.

DUNAS

Las dunas están formadas por arenas transportadas por el viento y presentan varias formas. Los vientos dominantes que soplan en una dirección forman depósitos de arena que alcanzan decenas de metros de altura en las zonas desérticas. La arena es producto de erosión eólica de la superficie rocosa en regiones cálidas y áridas que se encuentran a cientos de kilómetros de distancia. La arena seca es transportada mediante un proceso denominado salutación. Los cúmulos de arena suelen tener formas regulares como de luna creciente o médanos.

Las dunas de arena se pueden formar también en climas húmedos cercanos a la costa; a menudo causan problemas por su acción erosiva sobre las carreteras y techos de edificios.

LOESS

Es material que se compone de grano fino, transportado por los vientos dominantes que soplan desde los desiertos, situados a miles de kilómetros de distancia, pero cuando la velocidad del viento disminuye el polvo cae a la superficie y, con el paso del tiempo se acumulan formando depósitos de cientos de metros de espesor. El material de los niveles inferiores de los depósitos se consolida por el peso del material ubicado en las capas superiores.

TURBA

Son depósitos formados por la acumulación de una masa de vegetación parcialmente descompuesta. La turba se forma en climas fríos y húmedos, en donde el proceso de conversión del tejido vegetal en bióxido de carbono y agua se retarda debido a la escasez de oxígeno. La turba se encuentra principalmente en terrenos húmedos o pantanosos donde el drenaje del terreno es deficiente por que gran parte de la masa vegetal está saturada. En algunos de estos terrenos la roca dura sobresale a la superficie, alternando esta bruscamente con depósitos de turba. La construcción de caminos en terrenos parcialmente cubiertos de turba es difícil. Se debe conocer la profundidad de la cabecera de la roca y si por medio de los sondeos no se llega a la roca madre, se debe recurrir a la cimentación con pilotes.

ZONAS DE RELLENO

El término se refiere al material que se acumuló en lugares como antiguas canteras y excavaciones, y otras oquedades del terreno que se utilizaron como tiraderos para los desechos urbanos y material de demolición. Este material se usa para nivelar terrenos; esta práctica ha originado que la superficie de contacto entre el relleno y la roca madre puede ser muy pronunciada, es decir, el material puede ser poco consolidado y originar

posteriores hundimientos diferenciales, y como es práctica común que un relleno se utilice en infraestructura urbana lo cual requerirá de un levantamiento topográfico muy preciso.

2.7 SUELOS

El suelo representa todo tipo de material terroso, quedando excluidas las rocas sanas (ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados que no se ablanden o desintegren rápidamente por la acción de la intemperie). El agua juega un papel importante en el comportamiento mecánico del suelo, que debe considerarse como parte integral del mismo.

La corteza terrestre es atacada principalmente por el aire y las aguas, siendo los medios de acción de estas sustancias sumamente variados, sin embargo, todos los mecanismos de ataque pueden sintetizarse, como ya se dijo, en dos grupos: Desintegración mecánica y Descomposición química.

Los productos de ataque de los agentes de intemperismo pueden quedar en el lugar y directamente sobre la roca de la cual se derivan, dando así origen a suelos llamados *residuales*. Pero esos productos pueden ser removidos del lugar de formación, por los mismos agentes geológicos y redepositados en otra zona. Así se generan suelos que sobreyacen sobre otros estratos sin relación directa con ellos; a estos suelos se les denomina *transportados*.

Existen en la naturaleza numerosos agentes de transporte, de los cuales pueden citarse como principales los glaciares, el viento, los ríos y corrientes de agua superficial, los mares y las fuerzas de gravedad; estos factores actúan a menudo combinándose.

En general un suelo transportado queda descrito por un "perfil estratigráfico" que resalte la secuencia de colocación y el espesor de sus estratos.

En lo que respecta a suelos residuales existen dos conceptos que juegan un papel muy importante. Son éstos el perfil de meteorización y el conjunto de estructuras heredadas. El primero es la secuencia de materiales con diferentes propiedades debidas al proceso que se produce en las rocas expuestas a la atmósfera, es decir, tanto por ataque mecánico como por descomposición química, y puede variar considerablemente de un punto a otro, sobre todo por variaciones locales en el tipo y estructura de la roca, topografía, condiciones de erosión, régimen de aguas subterráneas y clima.

Las estructuras heredadas consisten en diaclasas, exfoliaciones, juntas, grietas, fallas y otros efectos estructurales que muestra el suelo como herencia de los que tenía la roca original. Su influencia es tal que frecuentemente las propiedades mecánicas de una muestra "intacta" del material no puede considerarse en absoluto representativa de las propiedades del conjunto.

Los suelos al igual que las rocas están constituidas predominantemente por ciertos minerales, ya mencionados con anterioridad, podemos decir que desde su estructura atómico molecular del mineral es el factor más importante para condicionar sus propiedades físicas. En los suelos gruesos el comportamiento mecánico e hidráulica esta

principalmente condicionado por su compacidad y por la orientación de sus partículas, por lo que la constitución mineralógica es hasta cierto punto, secundaria.

Partiendo de los numerosos minerales (principalmente silicatos) que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición química llegan a un producto final: la arcilla.

A diferencia de los suelos gruesos, el comportamiento mecánico de las arcillas se ve decisivamente influido por su estructura en general y constitución mineralógica en particular.

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas, existen dos variedades de tales láminas: la sílica y la aluminica.

De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcilla se encasillan en dos grandes grupos: caolinitas, montmorilonitas e illitas.

CAPITULO III

MÉTODOS GEOFÍSICOS

3.1 Método Sísmico

Al producirse una perturbación natural (sismo) o provocar artificialmente una oscilación en un punto del suelo, el movimiento inicial se transmite al medio circundante en forma de vibraciones llamadas sísmicas o sismo-elásticas. (Propiedad de los materiales).

Cuando se provoca una oscilación, dos tipos de ondas diferentes e independientes (en su propagación) entre ellas dan origen, por una parte, a las ondas longitudinales (P) que se propagan por compresiones o dilataciones sucesivas y por otra, a las ondas transversales (S) que se propagan sin variación de volumen y que se denominan también ondas de distorsión o de esfuerzo cortante; además de las ondas superficiales Love y Rayleigh.

El objetivo de los métodos sísmicos es describir especialmente la velocidad de propagación de las ondas.

Al modo de provocar una onda sismo-elástica se le llama fuente, esta se puede originar mediante caída de pesos, explosiones, vibradores, etc., generalmente emplazados en la superficie o a muy poca profundidad y en agujeros de diámetro pequeño (barrenos). La energía generada se propaga por el subsuelo y en el aire, y es recibida por sismodetectores o geófonos que transforman la vibración mecánica en señales eléctricas que son amplificadas, filtradas y registradas en los sismógrafos. La perturbación se propaga en el medio por frentes de onda que sufren modificaciones: reflexiones, refracciones, difracciones, dispersiones, etc. El parámetro experimental es el tiempo de arribo de las distintas ondas, al sufrir modificaciones cuando existe contacto entre capas en el subsuelo.

Perturbación mecánico-elástica -----> Refracción, Reflexión, etc.

Este método es de los mas empleados tanto tanto en Geotécnia como en exploración.

3.1.1 Sísmico de Reflexión

Este método es de los más costosos y precisos.

Se necesita producir una perturbación en la superficie del terreno, que logre propagarse a gran profundidad y registrar en un sismograma de varios segundos las reflexiones de las ondas que llegan a la superficie ; generalmente las ondas de interés son las longitudinales por su mayor velocidad de propagación.

Este procedimiento resulta complicado al determinar en los aparatos con cierta seguridad la onda de regreso cuando todavía la superficie del suelo esta en movimiento. Cuando existe una reflexión (cuando la onda de regreso llega a los aparatos), se observe un desplazamiento simultáneo de todos los geófonos que vienen a superponerse a los movimientos anárquicos precedentes. En este caso se define el tiempo total de la onda y así se obtiene la profundidad del estrato, en función de él, de la distancia entre la emisión y la recepción y la velocidad de la capa superior. Ver figura 3.1

Este método es muy empleado en la exploración de hidrocarburos, de yacimientos geotérmicos y para determinar y medir el espesor de los estratos. Su empleo a profundidades pequeñas es difícil. Además no aporta datos sobre la calidad de los materiales estudiados, tal como la alteración, fracturamiento, etc.

3.1.2 Sísmico de Refracción

Este método es utilizado cuando se requiere un reconocimiento de grandes espacios de terreno a poca profundidad.

La teoría matemática en que se fundamenta sigue practicamente las leyes de la Óptica. Se emplean ondas elásticas producidas por medio de perturbaciones instantaneas del estado de tensión del material. La energía necesaria para producir estas ondas es muy variable, tiene en cuenta tanto el volumen de los materiales como sus características mecánicas. El tiempo del registro es cuando mas del orden del segundo y las ondas grabadas (analogía digital) son producto de refracciones de discontinuidades del medio y los geófonos deben tener características distintivas según la dirección medida y el tipo de onda deseada. Una condición importante para la aplicación del método, es que la velocidad de propagación de las ondas aumente con la profundidad. Ver figura 3.2.

Una vez producido el impacto, la onda artificial llega sucesivamente a cada receptor (geófono), el cual transforma la energía mecánica en onda eléctrica y por medio de amplificadores, se registra el fenómeno sobre película, papel sensible o contador de tiempo, según el tipo de aparato empleado, ver figura 3.3. Con el tiempo que se ha registrado y conociendo la ubicación de cada receptor, se traza en coordenadas rectangulares el diagrama correspondiente, dibujando en abscisas las distancias y en ordenadas los tiempos de propagación.

Este diagrama se llama "Democrónica" y constituye la base de los cálculos que permite obtener velocidades de propagación, profundidades e información sobre la calidad de los materiales y los parámetros elásticos en obras civiles sujetas a vibración. Para ello, existen técnicas geofísicas, analíticas y numéricas. Ver figura 3.4.

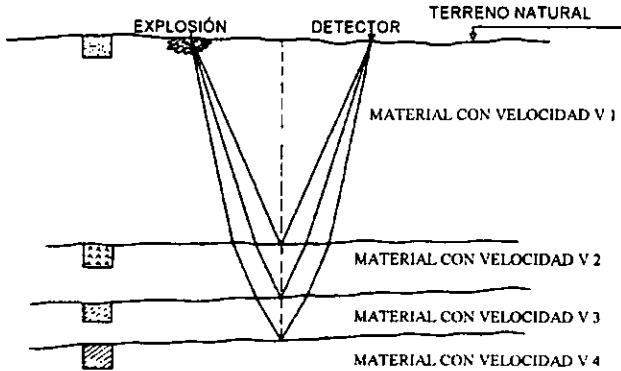


FIG.3.1 PRINCIPIO DE LA SÍSMICA DE REFLEXIÓN

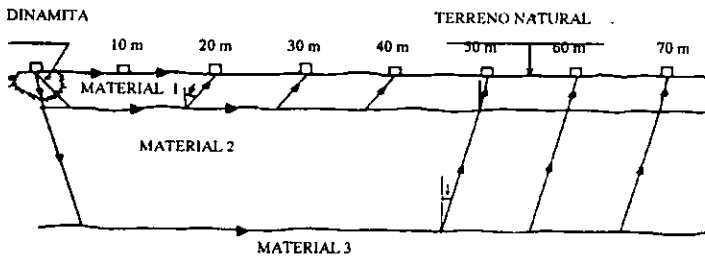


FIG. 3.2 PRINCIPIO DE LA SÍSMICA DE REFRACCIÓN
(VER REFERENCIA 1)

3.1.3 Uphole y Crosshole

Son técnicas más precisas porque las fuentes y/o los geófonos se ubican en los materiales que interesan, en el interior de barrenos.

La técnica Uphole consiste en situar en el interior de un barreno una serie de geófonos para registrar las ondas generadas por una fuente de energía ubicada en la superficie del terreno junto a la perforación. Este método sirve para detallar la información obtenida con Refracción y para definir la velocidad de las ondas en materiales de baja velocidad no definidas por el método de Refracción.

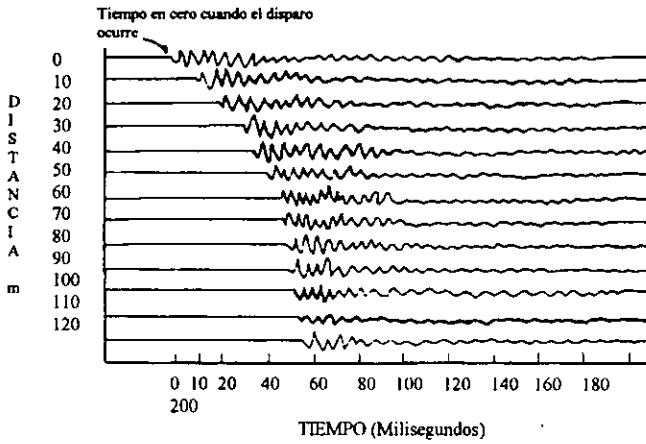


FIG. 3.3 OBTENCIÓN DE SISMOGRAMAS

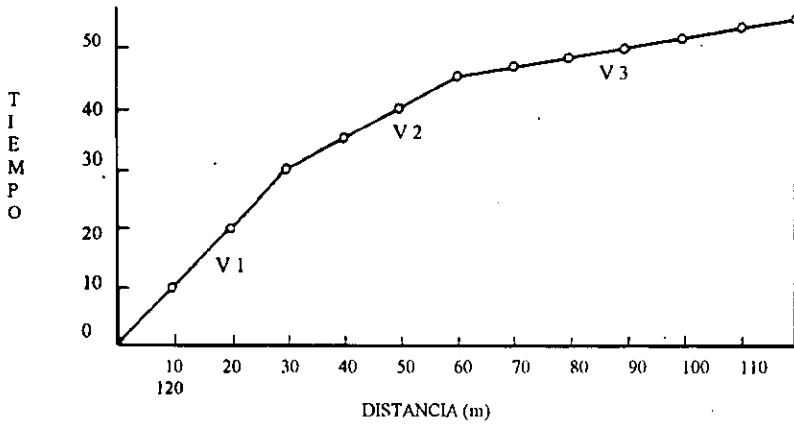


FIG. 3.4 DEMOCRONICA CORRESPONDIENTE. SISMICA DE REFRACCIÓN (VER REFERENCIA 1)

El método Crosshole (Davenport 1978) proporciona los mejores datos porque la fuente y la ubicación del geófono están en el mismo medio. El problema para la ejecución consiste en no dañar la perforación si se desea registrar varios horizontes.

Estas técnicas son útiles para aumentar la confiabilidad de la información en áreas de geología compleja, por ejemplo en túneles.

3.2. Métodos Eléctricos

Estas técnicas se ocupan comúnmente en problemas de Ingeniería Civil e Hidrogeología. Los métodos eléctricos se basan en la circulación de una corriente eléctrica (natural o artificial) en el subsuelo y se llevan a cabo mediante técnicas de medición de ciertas propiedades del campo eléctrico.

La operación consiste en medir, a partir de la superficie, los efectos producidos en el flujo de una corriente eléctrica por su paso a través de las formaciones que luego son correlacionados con información geológica a fin de definir las estructuras del subsuelo, para lo cual, existen varios métodos de investigación que se fundan en el estudio de la circulación de la corriente eléctrica.

Esta circulación se produce de dos formas: natural y artificial, la primera mediante corrientes telúricas y la segunda, se produce cuando se introduce una cantidad de corriente conocida por contactos galvánicos (electrodos).

Con los datos de campo se realizan varios diagramas que permiten interpretar cualitativa y cuantitativamente las mediciones realizadas. La interpretación cuantitativa se realice con el auxilio de gráficas bilogarítmicas, que se comparan con las de modelos previamente calculados u obtenidos con algoritmos numéricos; la interpretación cualitativa se da mediante la construcción de mapas de potencial, etc.

Todos los materiales facilitan en mayor o menor grado el flujo de la corriente, ya sea a través de los elementos sólidos (conductividad electrónica) o por medio de los iones de las sales disueltas en el agua que ocupan los intersticios de las rocas y suelos (conductividad iónica), en efecto, conductividad iónica esta relacionada con el volumen de los poros y con la disposición y el volumen de los poros remplazados por agua, lo que significa que un terreno compacto, presentara una resistencia elevada al paso de la corriente eléctrica; en caso contrario, si es poroso, tendra baja resistencia, la cual disminuye mas si los poros contienen agua y mas aún si es agua salada.

Como ya se indicó, una circulación artificial de la corriente es la que se lleva a cabo creando un campo de potencial, en la prospección eléctrica, lo más común es emplear corriente continua, estableciendo contacto entre los aparatos de medición (transmisor y receptor) y el suelo, protegiéndolos de fenómenos parasitos como la polarización y la resistencia. También es posible utilizar la corriente alterna para aprovechar fenómenos de inducción de tipo electromagnético.

El procedimiento de operación que se realiza en la superficie puede efectuarse, por lo regular de dos maneras. Cuando la geometría de la disposición de electrodos se conserve con respecto a un punto de simetría y sólo se incremente su tamaño, cuya investigación es a profundidad. Para el Perfilaje o Calicateo Eléctrico se emplean las mismas disposiciones de electrodos y el modo de operación es desplazar el centro de simetría sin incremento en el tamaño del arreglo, es decir, es lateral.

Los diferentes efectos que se producen en el subsuelo y que son medidos en la superficie, han dado lugar a diferentes métodos de prospección que se conocen como: mapas de potencial, relación de caídas de potencial, resistividad, polarización espontánea y polarización inducida.

3.2.1 Método de Mapas de Potencial

Consiste en emitir una corriente eléctrica de intensidad constante o un sistema bipolar o cuadripolar para la medición de la Diferencia de Potencial natural.

La interpretación de las líneas equipotenciales es generalmente de tipo cualitativo y se lleva a cabo observando sus distorsiones que presentan alrededor de cuerpos conductores, lo que permite dar idea sobre su forma y configuración. También se hace la interpretación por las desviaciones o refracciones del campo potencial cuando se tienen dos terrenos de resistividad diferente.

El método de líneas equipotenciales es el indicado para la búsqueda de cuerpos de extensión lateral reducida y situados a poca profundidad; este método resulta poco eficiente para el estudio de formaciones horizontales interestratificadas, donde las equipotenciales no sufren ninguna distorsión.

Este método se ha usado en la detección de cavidades cercanas a la superficie que contengan aire o rellenas de otro material.

3.2.2 Método de Relación de Caída de Potencial

Este método está basado en la medición no de diferencias de potencial, que generalmente son pequeñas, sino de coeficientes de caída de potencial susceptibles a variaciones importantes.

Básicamente el principio de medición es el mismo que utilizan los otros métodos eléctricos, empleándose dos electrodos de corriente A y B y tres electrodos de potencial M, N y P, generalmente perpendiculares a los primeros. Se trata de establecer la caída de potencial entre los electrodos M, N, P y establecer su relación con respecto a un electrodo de corriente (generalmente A) ya que el otro (B) considerándose al infinito, para fines de cálculo puede quedar eliminado.

Las ventajas que ofrece este método es dar más detalle que el método de resistividad en formaciones verticales de poco espesor (diques, filones, etc.).

En contraposición, existe el hecho de que las anomalías parásitas que se generan con los conductores de superficie son difíciles de eliminar y se corre el riesgo de que variaciones más importantes producidas por anomalías más profundas queden enmascaradas y por lo tanto, falsear la información buscada, es por eso que ha ido perdiendo aplicación.

Debido a que la relación de caídas de potencial se traduce a resistividades, la interpretación puede hacerse utilizando los mismos criterios que en el método de resistividad.

3.2.3 Método de Resistividad

Esta técnica utiliza un dispositivo cuadripolar para medir tanto la intensidad I como la diferencia de potencial V , lo que permite calcular la resistividad aparente de un terreno.

La oposición que muestran los materiales al paso de la corriente, es una resistividad aparente que resulta ser una función de la resistencia específica real de los terrenos, o su recíproco que es la conductividad, que afectan la circulación de la corriente. La base fundamental de la resistividad eléctrica es determinar y analizar las resistividades aparentes. La resistividad de un material es definida como la resistencia en ohmios entre las caras de un paralelepípedo unitario de material. La unidad usualmente empleada es el ohmio metro cuadrado por metro o el ohmio.metro.

La resistividad depende de las propiedades eléctricas del suelo y de la separación de los electrodos de corriente y potencial. Usualmente la medición se lleva a cabo haciendo sondeos eléctricos verticales con dispositivos de medida que facilitan el cálculo de las constantes geométricas.

El método permite no solo el estudio de formaciones horizontales, sino también de cuerpos subverticales tales como fallas, filones o diques a profundidades mayores que no son registradas por otros medios eléctricos.

La interpretación de resultados se lleva a cabo utilizando los valores de resistividad aparentes, a partir de los cuales se construyen diagramas de resistividad e isoresistividad aparentes; permiten visualizar en forma independiente o global la imagen de la estructura geológica del subsuelo, ver figura 3.5. Este tipo de estudios permite detectar las anomalías importantes y la profundidad a la que se encuentran. Este método es el más apropiado para definir estructuras con materiales de diferentes calidades o contenido de humedad.

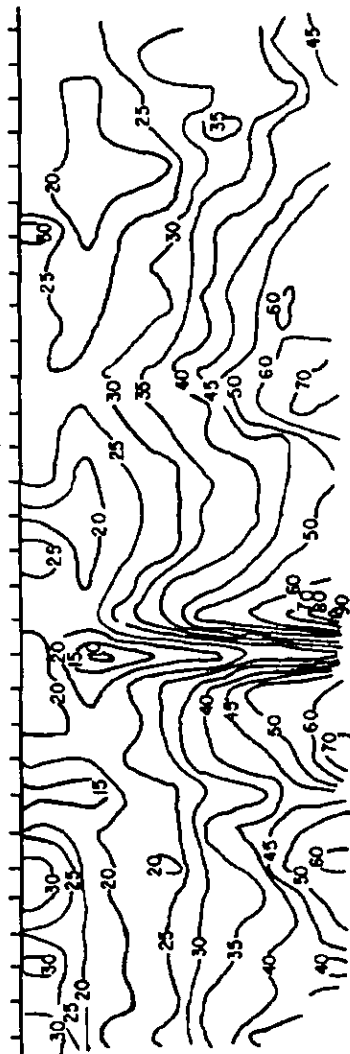


DIAGRAMA
 REPRESENTANDO
 LINEAS DE
 ISORRESISTIVIDAD

FIG. 3.5 METODO ELECTRICO RESISTIVO.
 (VER REFERENCIA 1)

Se aclara que las medidas resistivas no determinan ni la presencia de agua ni el tipo de material que hay en el subsuelo, sino que, en conjunto de medidas, determinan como es la distribución de la corriente eléctrica en el subsuelo, lo que indudablemente esta relacionado con la estructura.

La ventaja del método, calibrado con perforaciones, estriba en que no se tiene una información puntual, sino una información tridimensional de toda una zona sujeta a estudio; la práctica aconseja que se obtenga una cantidad suficiente de mediciones para poder registrar con seguridad las variaciones que muestran los terrenos, pues un solo sondeo eléctrico puede estar afectado por influencias laterales que distorsionan la realidad.

3.2.4 Método de Polarización Espontánea

El método se basa en la medición de las propiedades que poseen ciertos cuerpos de emitir una corriente eléctrica bajo condiciones bien definidas.

La polarización se produce en materiales bastante conductores y la diferencia de potencial natural que se genera es la que se trata de medir en este tipo de prospección, es decir, las corrientes parasitas que son susceptibles de medirse y de interpretarse tales como la polarización de minerales muy conductores o la debida a fenómenos hidrológicos (electrofiltración).

Para medir la polarización se requiere de un potenciómetro, dos electrodos impolarizables y cable conductor. Las mediciones se efectúan en forma de líneas perpendiculares a la zona o cuerpo donde se supone la mineralización. Se coloca el aparato y su electrodo en un punto fijo mientras que el otro se mueve de una distancia siempre constante. La interpretación de las medidas es generalmente de tipo cualitativo y solo en casos particulares se puede calcular la profundidad de un yacimiento dando sus dimensiones.

Los potenciales medidos son registrados a escala conveniente sobre planos que indican la ubicación de las estaciones de medición., en ellas se trazan las equipotenciales en forma semejante a los mapas de potencial.

Otra forma de interpretar es mediante el análisis de la repartición de potenciales. Los cuerpos mineralizados funcionan como una pila y la diferencia de potencial medida en superficie es debida a la resistencia del yacimiento. Mientras mas profundo esta el yacimiento, más débil es la corriente de llegada y mas pequeña es la caída ohmica. Se considera que para fines prácticos son interpretables valores superiores a 50 mV, valores inferiores resultan no provechosos.

3.2.5 Polarización inducida

Cuando por medio de un dispositivo tetrápolar clásico AMNB, se envía en el subsuelo una corriente entre A y B. y que se interrumpe bruscamente esta corriente, se observa que subsiste entre los electrodos MN una diferencia de potencial que se disipa en algunos decimos de segundo. Este potencial residual se llama polarización inducida.

El paso de una corriente eléctrica en una roca se acompaña de procesos electroquímicos, cuyo carácter e intensidad están subordinados esencialmente a las propiedades físicas y químicas de esta roca. Es conocido que una roca está constituida por un conjunto complejo de partículas metálicas, conductibilidad electrónica o partículas poco conductoras, tales como los silicatos asimilables a dieléctricos, pero la alteración de estos silicatos da lugar a una formación arcillosa que el agua de imbibición hace muy conductora.

En este tipo de estudio la interpretación es cualitativa y a veces cuantitativa. Es siempre cualitativa en lo que se refiere a los resultados en perfiles. Para un terreno subhorizontal, las anomalías se encuentran a la vertical del o de los cuerpos perturbadores. La intensidad de estas anomalías y el conocimiento de los factores geológicos locales permiten en la mayoría de los casos, hacerse una idea sobre el origen del cuerpo perturbador.

3.3 Método Termométrico

Este método está basado en la medición de la temperatura del suelo y del subsuelo. Se emplea la idea de gradiente vertical y de grado geotérmico. El gradiente vertical en el interior de un terreno es el cociente de la diferencia de temperaturas por la diferencia de profundidad, es en resumen, la diferencia de temperatura por unidad de profundidad. El grado geotérmico es la cantidad de metros (o centímetros) que se debe aumentar a la profundidad para que la temperatura suba un grado centígrado.

Este tipo de investigación es el que más se acerca a la meteorología. Se distinguen dos categorías de estudios: en la primera interesan los primeros metros de la superficie y la segunda investiga las capas profundas. En ambos casos se miden las temperaturas con termómetros o con pares termoelectrónicos según el caso.

La medición de las temperaturas superficiales sirven, por ejemplo, para la detección de fracturas, venidas de aguas, variación del nivel freático superficial, etc. La medición profunda sirve para la clasificación de los diferentes niveles de una perforación.

3.4 Método Gravimétrico

Aquí se determinan los efectos gravitacionales de atracción que producen los cuerpos por existir discrepancia entre la densidad de ellos y el medio que los rodea. Para medir la gravedad se utiliza el gravímetro que proporciona la diferencia de gravedad entre el punto de observación y un punto de base de gravedad absoluta conocida. La Ley de la Atracción Universal de Newton es la que sustenta la formulación teórica del Método.

La gravedad varía apreciablemente de un lugar a otro y se debe a la presencia de cuerpos densos o con escasez de masa, esten someros o profundos.

Se dice que existe una anomalía gravimétrica cuando existe diferencia entre las lecturas de gravedad observada en los puntos de interés y la que debería existir si la Tierra fuese un geoide homogéneo; es positiva si existieran cuerpos mas densos que el medio que los rodea y negativa si tuvieran deficiencia de masa (menos densos); la anomalía gravimétrica es mas ancha y de menos intensidad si el cuerpo objetivo es profundo.

Las correcciones tanto de topografía, por mareas (efecto luna-sol), aire libre, Bourger (para considerar la masa), y algunos otros procesos digitales nos ayudan a obtener la gravedad referida a un datum uniforme en todo el estudio.

La interpretación de los datos es doble, cualitativa y cuantitativa. Para la primera es necesario construir planos que expresen una idea del tipo de cuerpos y sus dimensiones. La interpretación cuantitativa es para definir la distribución de la densidad en el subsuelo y es sencilla si los cuerpos anómalos son de geometría regular, por conocer los efectos según expresiones analíticas y modelando con técnicas numéricas si la estructura del subsuelo es más complicada.

Las aplicaciones a Ingeniería Civil son escasas, se ha usado en Hidrogeología para la solución de algún problema geológico-estructural y en la búsqueda de cavidades naturales. En general la Microgravimetría se puede utilizar para la búsqueda de rocas compactas y densas o fracturadas con respecto a su entorno, cuya dimensión lateral sea comparable a su profundidad.

3.5 Método de Magnetometría

Es un método similar al Gravimétrico, con la salvedad de que no sólo se puede estudiar el campo vertical, sino las otras componentes o la intensidad total, y la propiedad física estudiada es la susceptibilidad magnética, las medidas de campo magnético se pueden realizar con magnetómetros de respuesta casi inmediata montados en vehículos en movimiento.

Es casi imprescindible el empleo de dos magnetómetros, uno en la estación base para las correcciones por declive y otro en los puntos de interés. El proceso digital y la interpretación de los datos magnéticos es similar a la utilizada en la información gravimétrica.

Su utilización para los casos de Geotecnia en la ubicación de cuerpos con alto contenido de minerales ferromagnéticos localizados en el trazo de alguna vía de comunicación o en la localización de tuberías de acero cubiertas de material.

3.6 Método de Trazadores Nucleares

Este método se basa en la circulación de agua en las rocas y suelos por medio de trazadores nucleares, consiste en el reconocimiento de la composición isotópica ambiental de las aguas.

El uso de radioisótopos puede llevarnos a considerarlos como trazadores en vista de su alta sensibilidad de detección. Se puede utilizar una combinación de radiotrazadores para estudiar la dinámica de cuerpos complejos.

Los radioisótopos satisfacen los mismos criterios para el uso de cualquier trazador. Este deberá presentar el comportamiento del agua que va a ser marcada y no sufrir pérdida debido a absorción durante el paso del agua a través del acuífero o del medio a través del cual pase el agua, para ello se deben considerar dos tipos de trazador radiactivo:

- a) Es aquel donde uno de los átomos de la molécula de agua es radioactiva, que será el trazador ideal. Para todo fin práctico, el Tritio es el trazador radioactivo de este tipo.
- b) Es un radioactivo en la forma de compuesto químico soluble en agua.

Hay una variedad de radioisótopos con diferentes tipos de emisión radioactiva y vida media apropiada para una investigación particular, sin embargo, el problema se centra en la necesidad de marcar un compuesto que no sufra pérdidas.

3.7 Método del Registro Geofísico en Pozos

Este método se emplea en el reconocimiento del subsuelo (sin límite de profundidad), usando una perforación previa. A diferencia de los otros Métodos Geofísicos que operan en o sobre la superficie del terreno, los registros se efectúan en el interior de agujeros de hasta un metro de diámetro. Con el transcurso del tiempo se han utilizado varios métodos geofísicos que aprovechan el uso de pozos como: el registro eléctrico, el registro termométrico, el sísmico y últimamente el radioactivo.

3.7.1 Registros convencionales

El registro de potencial espontáneo es el registro de la diferencia de potencial que existe entre un electrodo de referencia situado en la superficie y otro electrodo que se introduce en el pozo. Esta diferencia de potencial es causada por dos factores: la

electrofiltración, que es función de la diferencia de carga hidráulica, que origina que el fluido fluya hacia las formaciones permeables o viceversa y el potencial electroquímico, que es función de las actividades iónicas del lodo o agua en el pozo, respecto a la actividad del agua en las formaciones permeables adyacentes.

El potencial originado por efecto electroquímico es generalmente mayor que el producido por electrofiltración.

En el registro eléctrico, la resistividad es determinada mediante la emisión de una corriente eléctrica en el interior del pozo y midiendo la caída de potencial causada por esta corriente.

La interpretación de estos registros eléctricos se basa en los contrastes de resistividad que existen entre los distintos tipos de formaciones que atraviesa el pozo. En estos resultados se deben tener en cuenta las características de la perforación como son el diámetro, el tipo de máquina, el lodo, la presión de inyección, por ejemplo.

En el caso de registro sísmico, se producen vibraciones emitidas a lo largo de la perforación, que se miden a varias profundidades. Estas vibraciones pueden ser del tipo longitudinal o transversal según la necesidad. Además de la obtención de las velocidades sísmicas de cada formación, se puede medir la atenuación del tipo de ondas emitido en ella, a lo largo del pozo.

El registro termométrico consiste en equipar la sonda que va a bajar en la perforación de un termopar, cuya resistencia varía rápida o linealmente con la temperatura se traduce en diferencia de potencial que se registra en la superficie por medio de un puente de Wheatstone. Como cada tipo de material tiene una constante térmica diferente, se obtiene un corte termométrico a lo largo del pozo, teniendo en cuenta la variación del gradiente geotérmico.

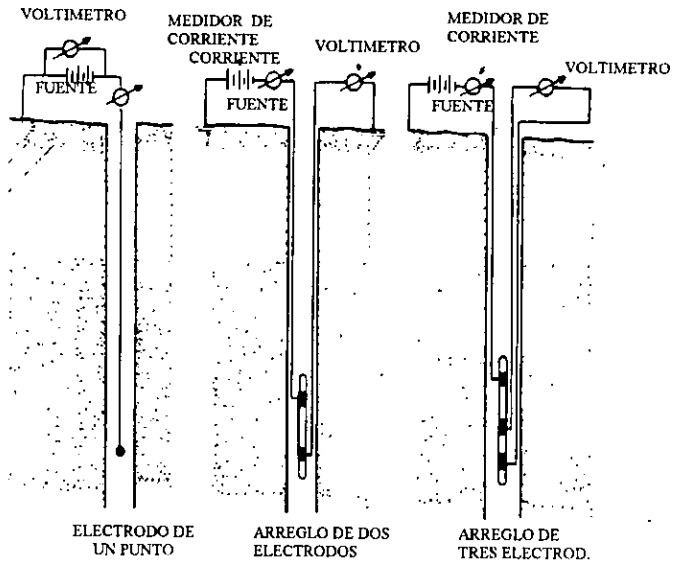


FIG. 3.6 ARREGLO DE ELECTRODOS EN UN REGISTRO ELECTRICO

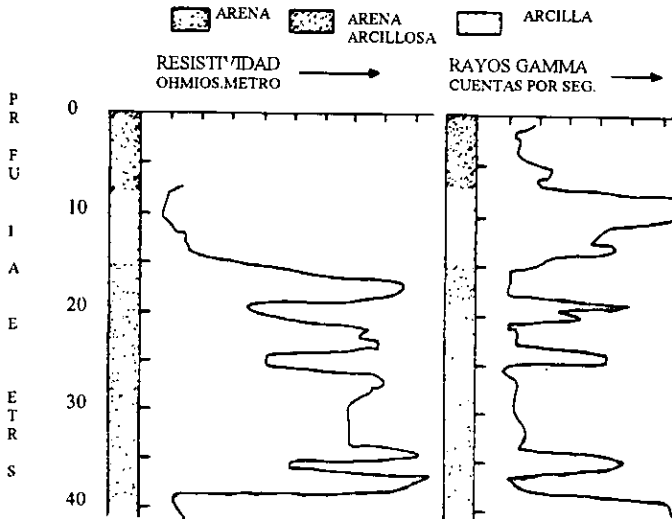


FIG. 3.7 COMPARACIÓN DE UN REGISTRO RESISTIVO CON UN REGISTRO DE RAYOS GAMMA (VER REFERENCIA 1)

3.7.2 Registros Radiactivos ó Radiometría.

Consiste en detectar en un Escintilómetro o Espectómetro las emisiones de radiación gamma del núcleo de átomos radiactivos localizados a poca profundidad y se pueden efectuar hasta en vehículos en movimiento. Este es un método que se puede usar para mapeo geológico en áreas cubiertas de vegetación, por que la mayoría de las rocas tiene un nivel de base de radiación gamma, ver figura 3.7.

La investigación geofísica por los métodos de registro radiactivo incluye:

- ◆ La radiación natural o método de gammas.
- ◆ El método de densidad o método de gammas-gammas.
- ◆ La radiación provocada o método de neutrón.

El método de gammas registra la radiactividad natural de las rocas. La radiación proviene de elementos radiactivos tales como Potasio 40 y las series de Uranio y el Torio con sus productos de decaimiento. Una estimación cuantitativa del nivel de radiactividad de las rocas, es generalmente representada como el radio equivalente (RaEq).

En las tablas se muestra claramente que los sedimentos organogéicos libres de arcilla y cuarzo son los menos radiactivos. Las arcillas arenosas estan caracterizadas por un incremento de radiactividad particularmente en el incremento de arcilla, ya que su intervalo de radiactividad es variable. De todas las rocas sedimentarias la roca arcillosa y la pizarra tienen los más altos y, comparativamente, constantes niveles radiactivos, ver las tablas 3.1 y 3.2.

El método de densidad o método gammas- gammas se realiza por medio de una sonda que contiene una fuente emisora de gammas y su detector correspondiente. Cuando la sonda se mueve a lo largo de la perforación el detector mide la radiactividad gamma dispersada. Debido a que la cantidad de radiación gamma detectada es función de la densidad de las rocas alrededor de la perforación, el método gammas-gammas proporciona una medida de la densidad volumétrica de la roca saturada y no saturada a lo largo del pozo. La intensidad de la radiación gamma registrada depende en general de la densidad del medio circundante, la longitud de la sonda de medición, la energía de la radiación y colimación de la fuente usada, el tipo y la sensibilidad del detector, así como el material y el espesor de la pared de la sonda, el diámetro de la perforación, la presencia o ausencia de ademe y la cantidad de caídos o sumandos.

En la radiación provocada o método de neutrón, esencialmente se registra la radiación neutrónica dispersada, emitida por una fuente de neutrones rápidos, cuando la sonda se mueve a lo largo de la perforación. Este método se basa en la relación funcional de la gran sección transversal de los átomos de hidrógenos para detener los neutrones rápidos y llevarlos a energías térmicas. El método neutrónico nos da una medida del contenido de hidrógeno del medio a lo largo del perfil de la perforación y puede ser usualmente usado en términos de humedad.

En estos métodos la sonda de medición se mueve a lo largo de la perforación que atraviesa la roca o suelo de la sección de investigación. Al moverse la sonda, se obtiene un diagrama del parámetro medido que se grafica en superficie; los resultados se obtienen esencialmente de manera cualitativa.

3.8 Percepción Remota

El principio de la percepción remota toma en cuenta que todos los objetos emiten o reflejan energía electromagnética, la cual puede ser detectada mediante dispositivos diseñados de acuerdo a la longitud de onda que se emita o refleje. Los detectores se ubican en aviones o satélites; tienen como objetivo almacenar la información obtenida, la cual a su vez es verificada en tierra en algunos puntos de control. Una vez registrada la información en imágenes es procesada para llevar a cabo una investigación.

TABLA No. 3.1

**VALOR MEDIO Y LIMITES DE VARIACION DE
RADIOACTIVIDAD EN ALGUNAS ROCAS SEDIMENTARIAS**

TIPO DE ROCA	RaEq(10-12 g/g de roca)
Anidrita	0.5
Carbón Café	1.0
Roca Marina	2.0
Dolomita	0.5-10
Caliza	0.5-12
Arenisca	1.0-15
Arena Arcillosa	2 -20
Caliza Arcillosa	2 - 20
Roca Arcillosa Carbonosa	3 -25
Roca Arcillosa	4 -30
Arcilla Bajo Mar	10-60

TABLA No. 3.2

**CONTENIDO DE RADIOELEMENTOS EN ALGUNAS ROCAS
SEDIMENTARIAS (g/g DE ROCA)**

TIPO DE ROCA	Ra (10-12)	U (10-6)	Th (10-6)
Arena	Hasta 1.5	Hasta 4.0	-
Cuarcita	0.54	1.6	-
Arcilla	1.3	4.3	13.0
Roca Arcillosa	1.09	3.0	-
Caliz	0.5	1.5	0.5
Dolomita	0.11	0.3	-

CAPITULO IV

CONDICIONES DE APLICABILIDAD DE LOS DIFERENTES MÉTODOS

4.1 Métodos Directos y Métodos Indirectos

Para dar principio a este tema se debe tener presente que la utilización de los métodos directos e indirectos para exploración y sondeo son alternativas complementarias entre si, no se sustituyen.

Cuando tratamos de estudiar la superficie del subsuelo lo primero que se piensa es elegir algún método de exploración, para este caso, por lo general, utilizamos un Método Directo, este consiste en realizar perforaciones en diferentes puntos del terreno para obtener muestras de suelo y posteriormente obtener datos que muestren algunas propiedades que pueden servir para la realización de una futura construcción, pero, muchas veces resultan insuficientes la cantidad de muestras obtenidas, sobre todo si se trata de un gran volumen de terreno y la constitución del terreno no es muy homogénea. El simple hecho de pretender llegar a un resultado más fiel en las características del lugar obliga a elevar costos y hacer más lento el proceso (mayor número de perforaciones y barrenos), además de que se proporciona una información puntual.

Cuando nos encontramos con problemas como el anterior la mejor solución es decidirse por algún otro método que satisfaga nuestras necesidades y uno de ellos es precisamente decidirse por utilizar un Método Indirecto, como lo es el uso de la Prospección Geofísica que procura dar una información más extensa (refiriendome al área y volumen) y, por supuesto, la combinación con un Método Directo que permitan resolver satisfactoriamente los problemas planteados.

Entre las generosidades que aporta una medición geofísica, es afectar un volumen de terreno generalmente importante, permite dar una imagen de la estructura geológica, valora parámetros físicos, como coeficientes de Poisson o módulo elástico. Además, por medio de ellos, se obtienen directamente datos sobre heterogeneidad o anisotropías del conjunto geológico. Basta teóricamente analizar las modificaciones locales o direccionales de las mediciones para subrayar anomalías.

4.2 Campos de participación de trabajos geofísicos

Actualmente el empleo de la geofísica ha sido útil en un sinnúmero de obras civiles, mencionando su valiosa ayuda en problemas de:

- > Vías Terrestres, Aeropuertos (Túneles, cortes, bancos de materiales, etc.)
- > Cimentaciones de Presas, galerías a presión, centrales hidroeléctricas (estructura, descompresión, zonas débiles, efecto del explosivo sobre la roca, etc.)
- > Estructuras en obras civiles (calidad de pilotes, cimentación de edificios, zonas karsticas, etc.)
- > Aguas subterráneas (rellenos, fracturación, abastecimiento de agua, etc.)

En cada uno de los grupos anteriores la forma de proceder y los resultados a obtener serán diferentes si se trata de proyecto, construcción o conservación de obras civiles.

Cuando se decide utilizar alguno de los Métodos Geofísicos, primero se debe valorar si es o no adecuado su uso, saber cuantos de ellos posiblemente se utilizarán para cubrir el problema planteado.

En términos más formales se entra a un estudio llamado de factibilidad, en el cual se trata de poner en claro todas las dudas que existan sobre cada una de las alternativas posibles. El volumen de estudios correspondiente a la Geofísica debe ampliarse y orientarse hacia el análisis de costos de las diferentes soluciones. De esta forma se tienen respuestas más claras para decidir en que etapa y/o etapas se va a utilizar él o los métodos, ya sea en forma separada o combinada, y la cantidad de mediciones por realizar.

En este sentido, la experiencia en el uso de los diferentes métodos ha convenido en darles uno o varios usos específicos, que permiten dar al ingeniero una adecuada elección; de esta forma, mostramos un cuadro comparativo en donde se resumen prácticamente las bondades de los diferentes métodos. Por un lado, se muestra el método aplicable y sus diferentes submétodos o modalidades, y en segundo, algunos de los problemas específicos que se pueden resolver con la geofísica.

MÉTODO	SUBMETODO	PROBLEMA
ELÉCTRICO	CALICATAS	VARIACIONES SUBVERTICALES. BANCOS DE MATERIAL, LÚMENES DE DESCAPOTE. ESTUDIOS GEOHIDROLOGICOS CON PERFORACIÓN DE POZOS SOMEROS DE ABASTECIMIENTOS DE AGUA PROVISIONAL.
	RESISTIVIDAD	CALIDAD DE LA ROCA, ZONA DE FRACTURAMIENTO, ZONA ARCILLOSA, ZONA DE FALLA A PROFUNDIDADES MAYORES QUE NO SON REGISTRADAS POR OTROS MÉTODOS ELÉCTRICOS. PERMEABILIDAD, ZONAS CARSTICAS, DIQUES, GRADOS DE SATURACIÓN. DEFINE ESTRUCTURAS CON MATERIALES DE DIFERENTES CALIDADES O CONTENIDO DE HUMEDAD.

MÉTODO	SUBMETODO	PROBLEMA
SÍSMICO	POTENCIAL ESPONTANEO	PRESENCIA DE CUERPOS ANÓMALOS, FRACTURAS, FLUJOS DE AGUA, CAMBIOS LITOLÓGICOS.
	MAPAS DE POTENCIAL	INDICADO PARA LA BÚSQUEDA DE CUERPOS DE EXTENSIÓN LATERAL REDUCIDA Y SITUADOS A POCA PROFUNDIDAD . POCO EFICIENTE PARA EL ESTUDIO DE FORMACIONES HORIZONTALES INTERESTRATIFICADAS. USADO EN LA DETECCIÓN DE CAVIDADES CERCANAS A LA SUPERFICIE QUE CONTENGAN AIRE O RELLENOS DE OTRO MATERIAL
	CAÍDAS DE POTENCIAL	DA MAS DETALLE QUE EL MÉTODO DE RESISTIVIDAD EN FORMACIONES VERTICALES DE POCO ESPESOR (DIQUES, FILONAS, ETC.) LA DESVENTAJA ES QUE LAS ANOMALÍAS PARÁSITAS SON DIFÍCILES DE ELIMINAR, POR LO TANTO FALSEA LA INFORMACIÓN.
	POLARIZACIÓN INDUCIDA	PARA TERRENOS SUBHORIZONTALES LAS ANOMALÍAS SE ENCUENTRAN A LA VERTICAL DE LOS CUERPOS PERTURBADORES.
	REFRACCIÓN	DUREZA DEL MATERIAL O CALIDAD DE LA ROCA, ZONA DE FRACTURAMIENTO, ARABILIDAD, DIQUES. CUANDO SE REQUIERE UN RECONOCIMIENTO DE GRANDES ESPACIOS DE TERRENO A POCA PROFUNDIDAD.
	REFLEXIÓN	MIDE EL ESPESOR DE LOS ESTRATOS, SU EMPLEO A PROFUNDIDADES PEQUEÑAS ES DIFÍCIL, NO APORTA DATOS SOBRE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES TALES COMO ALTERACIÓN Y FRACTURAMIENTO. SU EMPLEO EN LA EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS E HIDROCARBUROS.
	CROSSHOLE	CALIDAD DE LA ROCA, ZONA DE FRACTURAMIENTO, ZONA DE FALLA, TÚNELES. NO USAR CUANDO SE ENCUENTRE UN MACIZO DESLIZANTE, YA QUE LA DESORGANIZACIÓN DEL MATERIAL PUEDE OCASIONAR INFORMACIÓN DISTORSIONADA.

MÉTODO	SUBMETODO	PROBLEMA
MAGNÉTICO	<i>UPHOLE</i>	<i>USADO EN TÚNELES (ÁREAS DE GEOLÓGICA COMPLEJA) DETALLA LA INFORMACIÓN OBTENIDA CON REFRACCIÓN RESPECTO A LAS VELOCIDADES DE LAS ONDAS DE LOS MATERIALES DE BAJA VELOCIDAD.</i>
	MAGNETOMETRIA	<i>DIQUES O MANTOS VOLCÁNICOS, PROFUNDIDAD DE CUENCAS SEDIMENTARIAS Y ESTRUCTURA DE SU BASAMENTO. LEVANTAMIENTO EN ZONAS DE CUBIERTA VEGETAL DENSA. CUANDO NO SE CUENTA CON EQUIPO DE TRANSPORTE Y SE UTILIZAN HELICÓPTERO O AVIÓN. ROCAS DE CONTIENEN MAGNETITA, ALUVIONES AURÍFEROS.</i>
TERMOMÉTRICO		<i>LA MEDICIÓN DE TEMPERATURAS SUPERFICIALES SIRVEN PARA LA DETECCIÓN DE FRACTURAS, VENIDAS DE AGUA, VARIACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO SUPERFICIAL. LA MEDICIÓN PROFUNDA SIRVE PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES NIVELES DE UNA PERFORACIÓN.</i>
GRAVIMETRIA		<i>ZONAS CARSTICAS, CÚPULAS DE SAL, COLINAS SEPULTADAS, CAVIDADES NATURALES. EN GENERAL, LA MICROGRAVIMETRIA SE PUEDE UTILIZAR PARA LA BÚSQUEDA DE ROCAS COMPACTAS Y DENSAS O FRACTURADAS CON RESPECTO A SU ENTORNO.</i>
ELECTROMAGNÉTICOS		<i>DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS ASOCIADAS A FENÓMENOS VOLCÁNICOS.</i>
TRAZADORES NUCLEARES		<i>CIRCULACIÓN DE AGUA EN LAS ROCAS Y SUELOS.</i>

Cabe hacer mención que los métodos de prospección geofísica deben utilizarse de acuerdo a los objetivos que se persiguen, dado que es evidente que dependiendo de este objetivo existen métodos que son adecuados, en forma general, se puede decir que si se trata de encontrar parametros de resistencia, deformación y rigidez, en estos casos los métodos sísmicos resultan más apropiados; en cambio si se trata de definir condiciones litoestratigráficas, presencia de agua subterránea, existencia de oquedades en el subsuelo, en este caso el método de tipo eléctrico es más recomendable.

Si comparamos entre un método sísmico y un método eléctrico podríamos encontrar que no es mejor uno más que otro, debido a que cada uno muestran sus ventajas particulares. Sin embargo, el método sísmico ha tenido una acogida mayor por parte de organismos del sector público y privado en el país. Estadísticamente el método sísmico ha sido utilizado preferentemente en trabajos de obras magnas que requieren de una mayor precisión, no por ello resulta ser mejor. El método eléctrico ocupa un lugar favorable, debido en algunos casos, a la sencillez de su aplicación y por ofrecer costos muchísimo más bajos que el sísmico; sin embargo, la práctica ha demostrado que estos dos métodos se complementan entre sí.

4.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA GEOTECNIA.

Los Métodos Geofísicos son diversos y se pueden clasificar de varias maneras:

1. Tiempo. a) Estáticos: cuando el campo estudiado no varía sustancialmente con el tiempo; b) Relajación: la variable media si es dependiente del tiempo y el campo estudiado es invariante en el tiempo; y c) Dinámicos: si el fenómeno investigado es variable en el tiempo (Parisnis, 1976).
2. Aplicabilidad. a) Mayores: cuando las áreas de aplicación usual son varias, y b) Menores: si se emplea para resolver problemas muy específicos.
3. Sistema Operativo. a) Terrestres: cuando las lecturas se toman en la superficie del terreno; b) Marinos: en la superficie de masas de agua; c) Subterráneos: en el interior de cavidades; y d) Aéreos: sobre la superficie terrestre.
4. Objetivo. a) Detector de Cuerpos: si el objeto de interés es restringido lateralmente; y b) De Superficies: cuando lo buscado presenta rasgos de horizontalidad y de extensión lateral grande.
5. Origen de Campo. a) Natural: si el campo estudiado existe; y b) Artificial: si es creado para la toma de datos.
6. Escala. Someros y Profundos : dependiendo de la profundidad de investigación del método.
7. Técnica: Gravimetría, Magnetometría, Sísmicos, Eléctricos, Electromagnéticos, Registros de Pozos, Termometría, Percepción Remota.

4.4 IMPORTANCIA DE LAS MEDICIONES SOBRE LOS RESULTADOS

Si una operación matemática está bien hecha se espera obtener un resultado bueno, análogamente, en cualquier método geofísico utilizado si la medición sobre la cual se apoyan los procesos de interpretación son buenos, el resultado deberá serlo también, por lo tanto la importancia de obtener resultados precisos es fundamental. Esto se refleja en la calidad del trabajo presentado y esta en función, por una parte, del equipo elegido, y por otra, del personal humano que lo va a manejar, ambas partes íntimamente ligados.

En cuanto al equipo, deberá estar bien construido y cumplir con las siguientes cualidades: sensibilidad, fidelidad y robustez. Si el equipo no presenta estas cualidades no es apto para el trabajo. Además, un equipo funciona normal, cuando las mediciones no son influenciadas por factores ajenos.

Esto explica en parte las diferentes posibilidades de poder incurrir en un error, y una forma de saberlo es en el momento de la interpretación final donde el resultado no corresponde con el obtenido en otros procedimientos.

Si las mediciones ejecutadas son buenas y bien ubicadas, su procesamiento posterior cae en lo convenido. Se podrá equivocar en tomar criterios de interpretación, pero será fácil rectificarlos a bajo costo, ya que no será necesario repetir las mediciones de campo.

Con el afán de integrar mayor información que respalde el estudio hecho es común que se utilice una combinación de los diferentes métodos geofísicos. Es aquí donde se hace hincapié en el uso de los siguientes términos: Interpretación y Correlación.

Cuando se realiza una medición con algún método Geofísico, tomamos en cuenta que los datos obtenidos son "efectos físicos" que por sí solos no muestran resultados definitivos, si por ello, se pensara en tener al instante la característica de la roca, es aquí donde interviene la Interpretación de datos cuantitativos o numéricos para que en forma coherente se puedan convertir a datos cualitativos y exista una semejanza con las características de la roca, de esta forma, los datos que pudieran parecer cantidades abstractas adquieren un sentido claro en poderse interpretar. Este modo de proceder se da en cada uno de los métodos geofísico utilizados.

Cuando se analizan simultáneamente dos o más métodos geofísicos se da una Correlación de resultados que permiten integrar una descripción mas acertada del lugar en estudio. En la tabla Geofísica de descripción de la roca se pueden observar los valores que arroja el Método Sísmico y el Método Eléctrico, éstos valores contribuyen a la etapa de correlación, ver tabla 4.2.

TABLA 4.2

TABLA GEOFÍSICA DE DESCRIPCIÓN DE ROCA

TIPO DE ROCA	CARACTERÍSTICAS GEOFÍSICAS	DESCRIPCIÓN DE LA ROCA
A	Velocidad y Resistividad alta	Roca compacta, poco fracturada.
B	Velocidad alta y resistividad media	Roca compacta, poco fracturada, con cierta permeabilidad y poco alterada.
C	Velocidad alta y resistividad baja	Roca compacta, poco fracturada permeable y/o con contenido de arcilla dentro del fracturamiento.
D	Velocidad media y resistividad alta	Roca compacta, fracturada y poco alterada.
E	Velocidad media y resistividad media y baja.	Roca compacta, fracturada y alterada con cierta permeabilidad o argilitización. (zona de decompresión de ladera).
F	Velocidad baja y resistividad alta, media y baja	Roca de mala calidad (decomprimida, muy fracturada, con cierta permeabilidad o alterada por argilitización, talud, suelo).
Z.N.C	Zona no correlacionable (Anómala)	Corresponde a mediciones Geofísicas no correlacionables dentro del área estudiada y que pueden ser causados por zonas de intenso fraturamiento o estructuras como fallas o diques.
RANGOS		
Velocidad alta mayor de 3500 m/s		Resistividad alta de 500 ohms-m
Velocidad media de 2000 a 3500 m/s		Resistividad media de 200 a 500 ohm - m
Velocidad baja menor de 2000 m/s		Resistividad baja de 200 ohm - m

CAPITULO V

TEORÍA PARA EL MÉTODO DE TIPO ELÉCTRICO.

5.1 PRINCIPIOS DE ELECTRICIDAD

5.1.1 CARGA ELÉCTRICA

Benjamín Franklin fue quien estableció que los objetos cuentan con una carga positiva (+) o negativa (-) estas dos clases opuestas de carga eléctrica siguen una ley cualitativa de la electrostática que indica : cargas de igual signo se repelen y cargas de signo contrario se atraen.

Actualmente se sabe que las sustancias se transfieren cantidades muy pequeñas de electricidad negativa llamada *electrones*. La teoría atómica de la materia sostiene que todas las sustancias están constituidas de átomos y moléculas. Cada una tiene un núcleo central cargado positivamente. El núcleo consta de un número de *protones*, cada uno con una sola unidad natural de carga positiva y uno o mas *neutrones*, un neutrón es una partícula eléctricamente neutra. Normalmente un átomo de materia esta en un estado neutro o sin carga debido a que contiene en su núcleo el mismo número de protones que electrones que lo rodean. Si por alguna razón un átomo neutro pierde uno o mas electrones exteriores el átomo adquiere una carga positiva y se denomina ión positivo. Un ión negativo es un átomo que ha ganado una o mas cargas de electrones adicionales. Ver. Fig. 5.1 Cuando dos materiales se ponen en contacto intimo, algunos de sus electrones unidos débilmente pueden transmitirse de un material a otro.

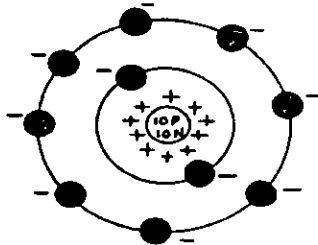


FIG 5.1 El átomo de neón consta de un núcleo empaquetado estrechamente que contiene 10 protones (p) y 10 neutrones (n). El átomo es eléctricamente neutro por que esta rodeado por 10 electrones.

5.1.2 AISLADORES Y CONDUCTORES

Algunos materiales principalmente metales, tienen un gran número de electrones libres, los cuales pueden moverse por el material. Estos tienen la capacidad de transferir electrones o carga de un objeto a otro, y se les llama *conductores*, por el contrario, un *aislador* es un material que se resiste al flujo de carga y un *semiconductor* es un material intermedio en su capacidad para llevar o transportar carga.

5.1.3 LEY DE COULOMB

La primera investigación teórica de las fuerzas eléctricas entre cuerpos cargados fue efectuada por Carlos Agustín Coulomb un 1784, quien determina que la fuerza de atracción o repulsión entre dos objetos cargados es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

$$F = \frac{k \cdot q \cdot q'}{r^2} \quad \text{Ec. 5.1}$$

la constante de proporcionalidad $K = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2 / \text{C}^2$

En unidad del SI, la unidad de carga se expresa en coulombs (C), donde $1 \text{ C} = 6.25 \times 10^{18}$ electrones Ver. Fig. 5.2

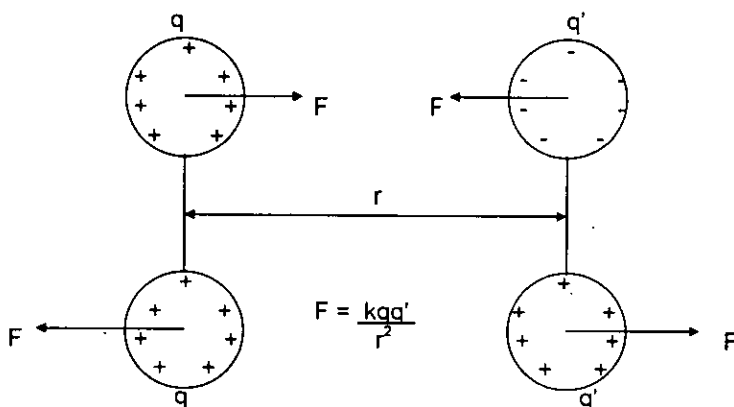


FIG. 5.2 GRÁFICA DE LA LEY DE COULOMB

5.1.4 CAMPO ELÉCTRICO

Una vez analizado el concepto de carga encontramos que alrededor de ella existe un campo eléctrico.

Aunque resulta un tanto difícil de visualizar, estos fenómenos físicos conocidos como fuerzas de acción a distancia, podemos encontrar que: si se coloca una carga en un punto y si se observa una fuerza en ese punto existe un campo eléctrico.

Cuando el espacio que rodea a un objeto cargado se altera por la presencia de su carga se dice que existe un campo, entonces podemos aseverar que la intensidad del campo eléctrico E en un punto en términos de la fuerza F . Experimentada por una carga positiva pequeña $+q$ cuando se coloca en dicho punto.

$$E = \frac{F}{q} \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$F = q E \quad \text{Ec. 5.4}$$

en el sistema métrico la unidad de intensidad de campo eléctrico es el newton por coulomb (n/c).

El campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva $+Q$ será hacia afuera o alejándose de la carga; contrariamente, si la vecindad de una carga negativa $-Q$, la dirección será hacia adentro, es decir dirigido hacia la carga Ver. Fig. 5.3



FIG. 5.3 A) El campo en la vecindad de una carga positiva está dirigido radialmente hacia afuera a cualquier punto. B) el campo está dirigido hacia adentro o hacia una carga negativa.

Sin necesidad de colocar una segunda carga en un punto, la intensidad de campo eléctrico se puede expresar

$$E = \frac{KQ}{r^2} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Cuando mas de una carga contribuye al campo, el campo resultado es la suma vectorial de las contribuciones de cada una de las cargas.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad \text{ó} \quad E = \sum \frac{KQ}{r^2} \quad \text{Ec. 5.6}$$

5.1.5 LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO

Las líneas de campo eléctrico son líneas imaginarias dibujadas de tal modo que su dirección (y sentido) en cualquier punto es la misma que la dirección y sentido de la intensidad del campo eléctrico en dicho punto.

En general, la dirección del campo eléctrico en una región del espacio suele variar de un punto a otro, por ello, normalmente las líneas son curvas. Deben seguirse dos reglas al construir las líneas de campo eléctrico.

1.- La dirección de la línea de campo en cualquier punto es la misma que la dirección en la cual se movería una carga positiva si fuera colocada en ese punto.

2.- El espacio de las líneas del campo debe ser de tal modo que estén mas juntas donde se tiene un campo fuerte y alejados entre si donde el campo es débil; las líneas siempre divergen de las cargas positivas y convergen en las cargas negativas. Ver figura 5.4

En el principio de Gauss el espaciado de las líneas se puede establecer un límite sobre el número de líneas dibujadas, en cualquier situación, puede decirse que el campo en una pequeña porción de su área ΔA es proporcional al número de líneas ΔN que penetran en dicha área $\Delta A/\Delta N$, sin embargo, se debe seleccionar una constante de proporcionalidad llamada *permisividad del espacio libre* (E_0)

$$E_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N.m}^2 \quad \text{Ec. 5.7}$$

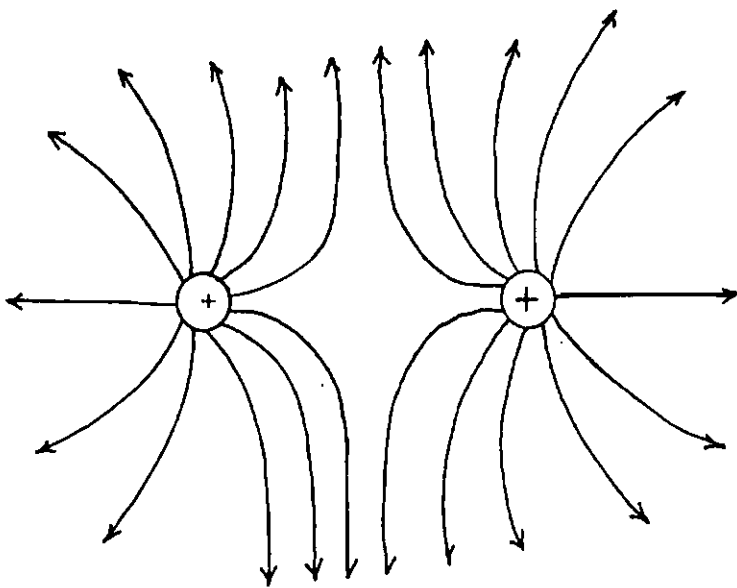
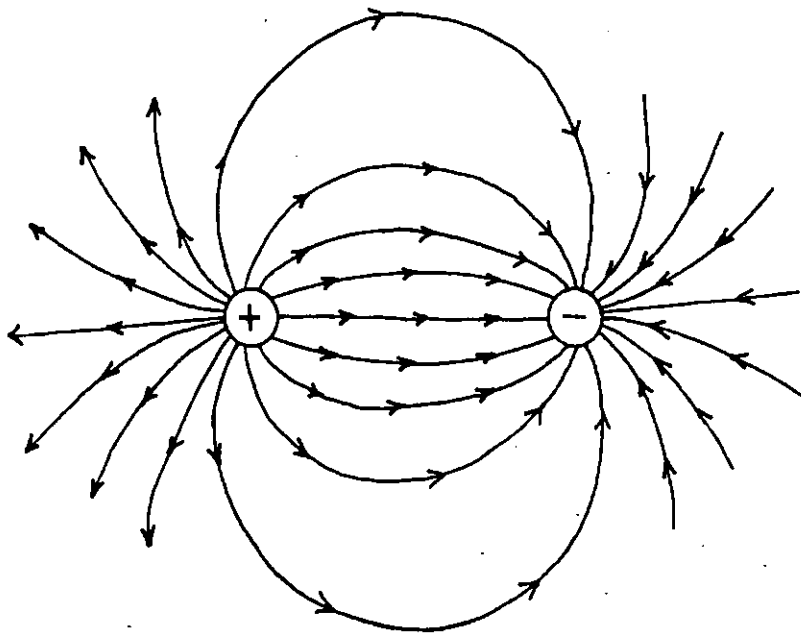


FIG. 5.4 PROPIEDADES DE LAS LINEAS DE CAMPO

5.1.6 ENERGÍA POTENCIAL

Si se requiere cierta cantidad de trabajo para mover una carga en contra de fuerzas eléctricas, esa carga debe tener un potencial para entregar una cantidad equivalente de energía cuando se libera.

$$EP = q Ed \qquad \text{Ec. 5. 9}$$

Siempre que una carga positiva se mueva en contra del campo eléctrico la energía potencial se incrementa; siempre que una carga negativa se mueva en contra del campo eléctrico, la energía potencial decrece.

$$EP = \frac{KQq}{r} = \text{trabajo} \qquad \text{Ec. 5.10}$$

Por lo tanto la Energía potencial del sistema es igual al trabajo realizado en contra de las fuerzas eléctricas al mover la carga +q desde el infinito a ese punto ver. Fig. 5.5.

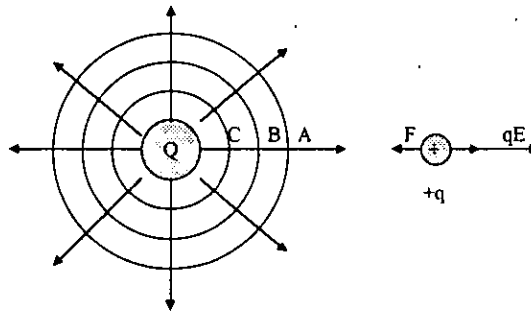


FIG. 5.5 La energía potencial debida a una carga colocada en un campo eléctrico es igual al trabajo realizado en contra de las fuerzas eléctricas al llevar la carga desde el infinito hasta el punto en cuestión.

5.1.7 POTENCIAL

El potencial se define como una propiedad del espacio que rodea a la carga debida a otra carga colocada en otro punto, igualmente nos permite se defina como: El potencial (V) en un punto a una distancia r de una carga a es igual al negativo del trabajo por unidad de carga realizado en contra de las fuerzas eléctricas al traer una carga + Q desde el infinito a dicho punto. Las unidades del potencial se expresan en joules por coulumb y se define como un volt (v)

Formula	Unidades	
$V = \frac{EP}{q}$	$(v) = (J) / (C)$	Ec. 5.11

Despejando EP queda: $EP = Vq$ Ec. 5.12

al sustituir la Ec. 5.10 en la Ec. 5.11 se obtiene una expresión para calcular directamente al potencial.

$$V = \frac{EP}{q} = \frac{kQq/r}{q} = \frac{KQ}{r} \quad \text{Ec. 5.13}$$

5.1.8 DIFERENCIA DE POTENCIAL

Cuando hablamos de diferencia de potencial se desea saber la cantidad de trabajo necesario para mover cargas entre dos puntos; es decir, el trabajo por unidad de carga positiva realizado por fuerzas eléctricas para mover una pequeña carga de prueba desde el punto de mayor potencial hasta el punto de menor potencial; en general puede encontrarse de:

$$\text{trabajo}_{A \rightarrow B} = q (V_A - V_B) \quad \text{Ec. 5.14}$$

5.1.9 CAPACITANCIA

La capacitancia indica la cantidad de carga que puede colocarse en un conductor, es decir, su capacidad para almacenar carga

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{Ec. 5.15}$$

La unidad de capacitancia es el colomb por volt o farad (F), por tanto, si un conductor tiene una capacitancia de un farad, una transferencia de carga de un coulumb al conductor elevará su potencial en un volt.

$$V \cong Q \quad \text{Ec. 5.16}$$

La energía necesaria para transferir electrones de la tierra al conductor es suministrada mediante un dispositivo eléctrico llamado batería.

El valor de C para un conductor dado no es función ni de la carga (Q) colocada en el ni del potencial producido (V), la razón Q/V permanece constante a medida que se coloca carga indefinidamente, sin embargo, la capacitancia depende del tamaño y forma del conductor, así como también de la naturaleza del medio circulante.

Hay un límite para la intensidad del campo que puede existir en el conductor sin que se ionice el aire circundante. Cuando ocurre esto al aire se convierte básicamente en un conductor, y cualquier carga adicional colocada en el material se "fugará" hacia él. Este valor límite de la intensidad de campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aisladora se convierte en un conductor se llama Rigidez Dieléctrica; ésta es igual, en aire seco a la presión de 1 atm alrededor de 3 MN/C.

Un capacitor es un dispositivo diseñado para almacenar carga eléctrica, por lo regular, un capacitor consta de dos conductores estrechamente espaciados que portan cargas iguales y de signos opuestos por tanto la capacitancia puede obtenerse con la siguiente fórmula:

$$C = E_0 \frac{A}{d} = \frac{Q}{V} \quad \text{Ec.5.17}$$

5.1.10 CORRIENTE

Ahora se tratará el estudio de las cargas en movimiento. El flujo de carga constituye una corriente eléctrica, en ella se trata de rapidez de carga a través de un conductor, por lo tanto, decimos que la corriente eléctrica I es la rapidez del flujo de carga Q que pasa por un punto dado P en un conductor eléctrico

$$I = \frac{Q}{t} \quad \text{Ec. 5.18}$$

La unidad de corriente eléctrica es el ampere. Un ampere (A) representa un flujo de carga a una rapidez de un coulomb por segundo, que pasa por cualquier punto

$$1A = \frac{1c}{1s}$$

Para explicar la dirección de la corriente eléctrica se tiene que un electrón fluye en dirección contraria al campo eléctrico y causa una subida de potencial, desde la placa negativa al positiva. Si se define la corriente como el flujo de carga positiva la pérdida de energía a medida que la carga encuentra resistencia será de + a - ó "sufre caída de potencial" por convención se considera que todos las corrientes consisten en un flujo de carga positiva.

Una fuente de fuerza electromotriz (fem) es un dispositivo que convierte energía química, mecánica u otras formas de energía, la energía eléctrica necesaria para mantener un flujo continuo de carga eléctrica. Una fuente de fem de un volt realizará un joule de trabajo sobre cada coulomb de carga que pasa por ella.

5.1.11 LEY DE OHM

La resistencias (R es definida como la oposición al flujo de carga eléctrica. Aunque la mayoría de los metales son buenos conductores de la electricidad, todos ofrecen alguna oposición al flujo de carga eléctrica que pasa a través de ellas. Esta resistencia eléctrica es estable para muchos materiales específicos de tamaño, forma y temperatura conocidos; es independiente de la fem aplicado y de la corriente que pasa a través de ella.

La Ley de Ohm indica que la corriente producida en cierto conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre sus puntos extremos $R = V / I$ La unidad de medida de la resistencia es el ohm (Ω).

5.2 TEORÍA PARA EL MÉTODO DE TIPO ELÉCTRICO

En la prospección Eléctrica es básico el conocimiento de las propiedades eléctricas de las rocas, de ellas, tres son las que mas interesan:

- Resistividad eléctrica
- Actividad electroquímica
- Constante Dieléctrica
- Polarizabilidad

Este grupo de propiedades interactúan entre ellas y representan una manifestación del medio hacia los efectos en la que esta sometido.

5.2.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La Resistividad Eléctrica (ρ) condiciona la cantidad de corriente que atraviesa una roca al serle aplicada una determinada diferencia de potencial. La Resistividad eléctrica se determina numéricamente por la resistencia que se obtiene en un centímetro cúbico de esa sustancia, tomado en forma de cubo, a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente aunado de las aristas de ese cubo.

Si la resistencia de un cilindro conductor de longitud L, área transversal S y de resistencia R; la resistividad ρ viene expresada por la fórmula

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad \text{Ec. 5.19}$$

La unidad de resistividad en el sistema métrico decimal es el ohmio por centímetro. En la exploración eléctrica se utiliza el ohm.metro. Por ser una unidad mayor (1 ohm. m = 100 ohm. cm).

La intensidad I de la corriente esta relacionada con el voltaje aplicada V y la resistencia R, por la Ley de ohm.

La magnitud inversa de la resistividad se denomina conductividad eléctrica. Sus dimensiones se da en siemens por metro (sm/m)

$$r = \frac{1}{\rho}$$

Ec. 5.21

Se distinguen en los minerales y rocas dos clases de conductividad: una llamada metálica o electrónica, que la poseen ciertos minerales que conducen la electricidad como los llamados metálicos y que se verifican por transporte de electrones. Ejemplo son la pirita, la galena, el sulfuro de cobre, la magnetita y la pirolusita. Esta conductividad puede desaparecer en estos minerales por la interposición de una ganga aislante como el cuarzo, pues impide la comunicación directa entre los cristales del mineral.

La otra conductividad se llama electrolítica o iónica y se refiere a minerales y rocas aislantes en estado de sequedad como las arenas cuarzosas o las areniscas, pero que conducen la corriente merced al gua que contienen; en este caso existe transporte de iones al paso de la corriente y la conductividad es función de la cantidad de agua que contienen y de la cantidad de sales ionizadas disueltas en ella. La resistividad en estos se puede expresar prácticamente por el producto R.P. donde R es la resistencia específica del agua que impregna la roca y P un factor, que depende del porcentaje de agua con relación al volumen de la roca.

A una roca como conductor de corriente eléctrica se le puede considerar como un agregado que consta de un esqueleto sólido mineral de líquidos y gases.

En la resistividad de un agregado tal influyen los siguientes factores.

- 1) La resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca (su esqueleto)
- 2) La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca.
- 3) La humedad de la roca.
- 4) La porosidad de la roca
- 5) La textura de la roca y la forma y distribución de sus poros
- 6) los procesos que ocurran en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral

A continuación se muestran los valores de la resistividad de algunos minerales que constituyen las rocas. Ver tabla 5.1. A grandes rasgos podemos observar que los minerales del grupo silicatado la resistividad es muy grande y oscila entre 10^6 y 10^{15} ohm.m. la resistencia de los metales nativos que poseen conductividad electrónica oscila entre 10^{-6} y 10^{-4} ohm.cm. Las rocas y minerales con resistividades comprendidas entre 10^{-6} y 10^{-1} ohm.cm son considerados como buenos conductores; de 10^0 a 10^9 ohm.cm son considerados como conductores intermedios y de 10^{10} a 10^{17} ohm.cm como malos conductores.

TABLA 6.1 RESISTIVIDAD DE MATERIALES ROCOSOS TÍPICOS	
MATERIALES	RESISTIVIDAD ohm/cm
MINERALES:	
Galena	0.5 - 5.0
Pirita	0.1
Magnetita	0.6 - 1.0
Grafito	0.03
Sal gema	$3 \cdot 10^3$ - $5 \cdot 10^5$
Serpentina	$2 \cdot 10^4$
Siderita	$7 \cdot 10^3$
ROCAS ÍGNEAS:	
Granito	10^8
Diorita	10^6
Gabro	10^7 - $1.4 \cdot 10^9$
Diabasa	$3.1 \cdot 10^5$
ROCAS METAMÓRFICAS:	
Gneis	$2 \cdot 10^7$
Micacita	$1.3 \cdot 10^5$
Pizarra	$6.4 \cdot 10^4$ - $6.5 \cdot 10^6$
ROCAS SEDIMENTARIAS:	
Pizarra de Chattanooga	$2 \cdot 10^3$
Conglomerados	$2 \cdot 10^3$ - $1.3 \cdot 10^6$
Arenisca ferruginosa	$7 \cdot 10^5$
Conglomerados	$2 \cdot 10^3$ - $1.3 \cdot 10^6$
Caliza	$1.8 \cdot 10^4$
Marga	$7 \cdot 10^3$
Sedimentos de glaciares	$5 \cdot 10^4$
Arena petrolífera	$4 \cdot 10^3$ - $2.2 \cdot 10^4$

Cuando existe presencia de agua en las rocas deberá medirse la resistividad de los fluidos que saturan las rocas que puede variar entre amplios límites. En la mayoría de los casos estos líquidos son soluciones acuosas de diversas sales minerales, entre las cuales juega un papel importante el Cloruro de Sodio NaCl. La resistividad del agua que lleva los poros de las rocas esta en relación inversa a la concentración de la sal en disolución.

$$\Delta \text{ SALES} \Rightarrow \nabla \text{ RESISTIVIDAD AGUA} \therefore \Delta \text{ CONDUCTIVIDAD}$$

$$\nabla \text{ SALES} \Rightarrow \Delta \text{ RESISTIVIDAD AGUA} \therefore \nabla \text{ CONDUCTIVIDAD}$$

En la figura 5.6 esta representada la curva de dependencia de la solución NaCl de su concentración en el agua. La curva esta construida en escala bilogarítmica, es decir, en los ejes coordenados se llevan los logaritmos decimales de la resistencia de la solución y su concentración en gramos por litro.

En condiciones naturales la resistencia mínima (1 ohm.m y menos) la poseen las aguas profundas fuertemente mineralizadas y también las marinas.

La resistencia de la aguas subterráneas oscila en función de la mineralización entre 10^{-2} y 10^2 ohm.m. Las resistencias muy altas del orden de decenas y centenas de ohm.m) corresponden a aguas fluviales debidamente mineralizadas.

En la resistividad del agua que se encuentra en los poros de las rocas tiene influencia su temperatura, según la fórmula.

$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha (t - 18^\circ)} \quad \text{Ec 5. 22}$$

en la que ρ_t es la resistencia de la solución a la temperatura t ; ρ_{18} = resistividad de la solución a la temperatura de 18°C , α es un coeficiente de temperatura de la conductividad eléctrica, igual en promedio a 0.025.

También el esqueleto mineral de las rocas, habitualmente conduce la corriente mucho peor que las soluciones que rellenan sus poros.

De este modo en las rocas la corriente eléctrica discurre prácticamente solo por el electrolito que rellena sus poros.. En relación con esto la conductividad eléctrica de las rocas es esencialmente electrofónica (iónica). De aquí se deduce que la humedad de las rocas debe influir fuertemente en su resistividad.

Si designamos por ρ_v la resistencia de la roca totalmente saturada de humedad por K_v un coeficiente igual a la relación del volumen de la parte del espacio poroso ocupado por la humedad al volumen total del espacio poroso, entonces la resistividad de las rocas para la humedad dada ρ_{kv} se puede calcular por la siguiente fórmula empírica.

$$\rho_{kv} = K_v \cdot \rho_v \quad \text{Ec. 5.23}$$

Si la roca se encuentra bajo el nivel de las aguas subterráneas, los poros de la misma están totalmente saturados de humedad. En este caso el valor absoluto de la humedad se determina por la porosidad de la roca.

En la superficie de separación de la fase líquida y sólida, o que es lo mismo, en el contacto del esqueleto mineral y del líquido de los poros ocurre un proceso de absorción de iones (habitualmente de aniones (-)). Absorbidas en la superficie del esqueleto mineral, estos iones forman un revestimiento de una capa eléctrica binaria fuertemente enlazada con él. En conjunto, en ausencia de un campo eléctrico externo, la capa binaria es eléctricamente neutra.

La influencia de la capa eléctrica binaria en la resistencia total de la roca se reduce a que en el líquido de los poros normalmente tiene una mayor concentración de iones y, a causa de ello, una conductividad eléctrica elevada. En relación con esto, la conductancia de las rocas crece a medida que aumenta la extensión de la superficie de separación entre las fases sólida y líquida.

En relación de la resistividad de las rocas con su estructura ; tienen que ver la orientación del esqueleto mineral y poros. Si estos se encuentran desordenadamente la resistividad de tal roca será la misma en cualquier dirección (roca isotropa), en cambio si el esqueleto mineral y poros tienen una forma acomodada las condiciones de paso de la corriente en la roca sean distintas para las diversas direcciones, de esto forma, la resistencia de tales rocas depende de la dirección, o decir la roca, desde el punto de vista eléctrico es *anisótropa* Ver Figuras 5.7 A y 5.7 B respectivamente.

En la dirección designada en la figura 5.7 B con la flecha de puntos la resistividad de la roca será mayor que en la dirección coincidente con la orientación de los granos minerales y poros entre los mismos de tal forma $\rho_n > \rho_t$

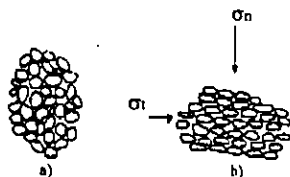


FIG. 5.7 TEXTURA DEL ESQUELETO MINERAL DE UNA ROCA. a) ISÓTROPICA; b) ANISÓTROPICA. (VER REFERENCIA 2)

Por lo que se refiere a la humedad y textura son diferentes para los tres tipos de rocas sedimentarias, eruptivas y metamórficas.

Rocas sedimentarias. Se caracterizan por resistencias bajas en comparación con los otros tipos de rocas. Esto se explica por su gran porosidad y, en caso de yacer bajo el nivel de las aguas subterráneas, también por su humedad elevada.

Rocas eruptivas. Se caracterizan por los valores mas altos de la resistividad. Esto es debido enteramente a que el grupo dado de rocas tiene una porosidad propia muy pequeña en comparación con la porosidad de las demás rocas.

La resistencia de las rocas eruptivas fisuradas que sirven como vías para la circulación de las aguas subterráneas es mas baja que la resistencia de estas mismas rocas en estado masivo.

Rocas metamórficas. En cuanto a su resistividad ocupan una posición intermedia entre las rocas sedimentarias y eruptivas, la porosidad y humedad de las rocas metamórficas depende principalmente del grado de metamorfización, ello la resistividad es tanto mayor cuanto mayor sea el grado de su metamorfismo.

Este tipo de rocas han sido sometidas por influencias dinámicas, es por ello su característica estructura esquistosa por la cual las partículas de roca y poros se extienden en la dirección de esa esquistosidad. En relación a esto la resistencia de las rocas en la dirección de la esquistosidad que es menor que en la dirección perpendicular a ella. Por consiguiente las rocas metamórficas a menudo presentan anisotropía eléctrica.

5.2.2 ACTIVIDAD ELECTROQUÍMICA

La actividad electroquímica depende de la composición química de las rocas y también de la composición y concentración de los electrolitos disueltos en el agua del suelo con los cuales están en contacto y equilibrio.

De ello depende la magnitud y signo del voltaje engendrado cuando el material rocoso esta en equilibrio con un electrolito.

La actividad electroquímica encuentra su aplicación práctica más importante en el registro de diferencia de potenciales (Método del Autopotencial) Esta diferencia de potencial (V) es igual según Pierre es:

$$V = K \cdot DP / \mu \sigma$$

Ec. 5.24

donde:

P= presión que produce la filtración

D= constante dieléctrica del electrolito

μ = coeficiente de viscosidad del electrolito

σ = conductividad especifica del electrolito

K= coeficiente que depende del electrolito y de la naturaleza química de la pared porosa.

5.2.3 CONSTANTE DIELECTRICA

La constante dieléctrica de las rocas influye de modo significativo en el carácter de los campos electromagnéticos de la tierra solo en el caso en que la frecuencia supera la decena y en ciertos casos el millar de kilohertzios. Por ello, este parámetro juega un papel, solo en los métodos de explotación eléctrico en los que se estudian campos de frecuencia de ondas radioléctricas.

La polarización o momento eléctrico por unidad de volumen P, es proporcional al campo eléctrico aplicado E y la constante de proporcionalidad es $\epsilon - \epsilon_0$, o sea, la susceptibilidad eléctrica. El flujo eléctrico total por unidad de superficie (correspondiente a la densidad de flujo magnético) es $E + 4\pi P$ ó $(1 + 4\pi \epsilon)$ E. La cantidad $(1 + 4\pi \epsilon)$ se designa con k, la constante dieléctrica.

Esta propiedad determina la capacitancia efectiva de un material rocoso y, por consiguiente, su respuesta estática a cualquier campo eléctrico aplicado, continuo o alterno. La constante dieléctrica del vacío es la unidad: para las rocas muy duras varía entre 6 y 16 unidades electrostáticas y para los suelos y arcillas húmedas es algo mayor de 40 a 60 ues. De aquí se deduce que la constante dieléctrica de las rocas depende en realidad de su humedad.

Para las rocas con humedad muy pequeña w, esta dependencia se escribe por la siguiente fórmula empírica: $\epsilon = \epsilon_0 W^n$, en la que ϵ_0 es la permeabilidad dieléctrica de la roca seca y n un coeficiente que depende de la textura de la roca.

5.2.4 POLARIZABILIDAD

Si un trozo de roca o mineral se encuentra en un campo eléctrico, entonces bajo la influencia de este campo, las rocas o minerales se polarizan.

El proceso de polarización de las rocas conductoras por ionización se reduce a la deformación, bajo la influencia del campo polarizante, de las capas eléctricas binarias que se forman en el límite de las fases sólido y líquido. Las rocas y minerales que poseen conductancia electrónica se polarizan debido a la formación de capas eléctricas binarias que surgen en el contacto de los medios con conductancia electrónica e iónica, a través de este contexto pasa la corriente eléctrica.

Como característica de las propiedades de polarización del medio se emplea el parámetro η , denominado polarizabilidad del medio:

$$\eta = -4\pi \rho_{vp} / E \quad \text{Ec. 5.25}$$

Siendo P_{vp} el momento de polarización de la unidad de volumen del medio y E la intensidad del campo polarizante. El signo menos indica que el campo polarizante, y el momento de polarización tienen sentidos opuestos.

Existe otro método para la determinación de η .

$$\eta = \frac{E_{vp}}{E} \cdot 100\% = \frac{\Delta U_{vp}}{\Delta U} \cdot 100\% \quad \text{Ec. 5.26}$$

Donde E_{vp} y ΔU_{vp} son la tensión y diferencia de potencial del campo creado en el medio polarizado, entre ambos puntos de este medio, E y ΔU la tensión y diferencia de potencial del campo polarizante entre estos mismos puntos del medio.

La polarización de las rocas que contienen conductores electrónicos, oscila entre unidades y decenas de porcentajes. La polarizabilidad de las rocas de conducción iónica, en conjunto es mucho menor que la polarizabilidad de las rocas que contienen conductores electrónicos y no excede de algunas unidades de porcentaje.

5.3. PRINCIPIOS PARA LOS DIFERENTES MÉTODOS ELÉCTRICOS

5.3.1 MÉTODO DE AUTOPOTENCIAL

Este método implica la medida, en la superficie, de los potenciales eléctricos engendradas en el suelo por acción electroquímica entre los minerales y las soluciones con las cuales están en contacto. Sin aplicación de campos eléctricos externos. Cuando las diferentes partes de una masa mineral están en contacto con disoluciones de composición distinta, tienen lugar reacciones químicas que dan por resultado diferentes presiones de disolución en las respectivas superficies de contacto. Las diferencias en las presiones de disolución engendran diferencias de potencial que originan un flujo de corriente en el suelo.

Fuentes de potencial. La causa mas simple de las diferencias de composición de las soluciones que circundan una masa mineral es la oxidación diferencial del mineral, por ser frecuente que las formaciones no consolidadas próximas a la superficie estén más aireadas en la zona subyacente. Una masa mineral alargada, de pirita por ejemplo, que penetra en la zona de oxidación precedente de las rocas subyacentes deficientes en oxígeno, se oxidará cercano a la parte superior, pero no en su superficie interior. La oxidación de la pirita produce ácido sulfúrico, que es neutralizado por los carbonatos antiguos a la masa mineral y la disolución de sales. Aquí se da una diferencia de potencial que da lugar a una corriente que circula entre los extremos superior e inferior de la masa de pirita y la corriente de retorno a través del suelo ver figura 5.8 origina una anomalía de potencial mensurable en la superficie.

De igual forma esta diferencia de potencial de concentraciones diferentes de un electrolito puede ser calculada según Lasfargues por.

$$\Delta V = \frac{1.98 \times 10^{-4}}{n} T \log_{10} \frac{P'_1 C_2}{P'_2 C_1} \quad (\text{en volt}) \quad \text{Ec 5.27}$$

donde:

C_1, C_2 = Concentraciones iónicas distintas.

n = valencia del metal

T = Temperatura absoluta

P'_1, P'_2 = Presión electrolítica de disolución mineral en el ánodo y cátodo respectivamente.

Por lo regular este método es una analogía del funcionamiento de una pila.

Brant ha indicado que no todas las masas de sulfuros próximas a la superficie presentan anomalías de potencial, dado que existen muchas condiciones en la superficie que inhiben la oxidación, virtualmente ausente por debajo de la capa freática. Los efectos de la acción electroquímica subterránea están con frecuencia enmascarados por fuentes extrañas de potencial debidas a variaciones en altura y corrientes telúricas.

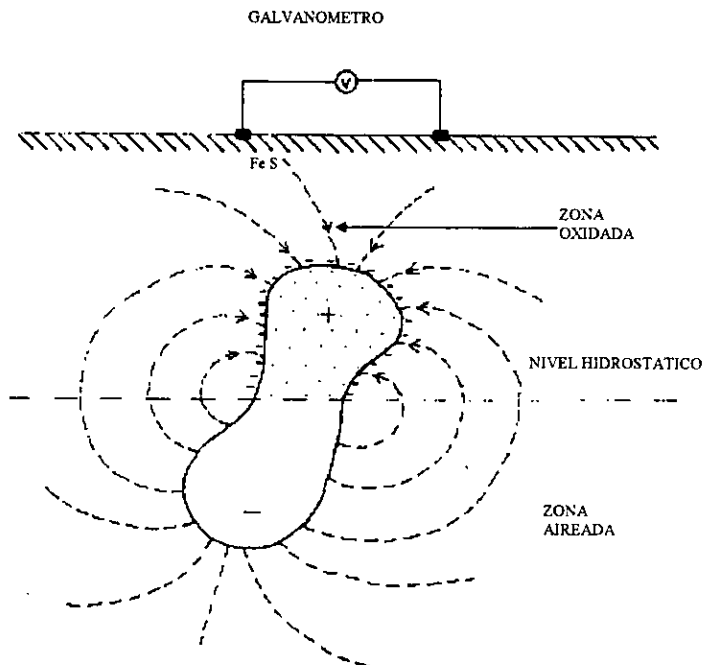


FIG. 5.8 PERFIL DEL POTENCIAL NATURAL SOBRE UNA MASA DE SULFUROS OXIDADA EN SU PARTE ALTA (VER REFERENCIA 2)

Práctica del Método. El material empleado consta sólo de un galvanómetro muy sensible y dos *electrodos impolarizables* unidos a él por conductores aislados.

Uno de los electrodos queda fijo y el otro se mueve de modo que se tantea un punto en el cual, el galvanómetro no avise paso de corriente. Esto significara que ambos están sitiados sobre una misma línea equipotencial. De esta manera se buscaran los puntos hasta obtener una serie de ellos que nos permita dibujar una línea equipotencial.

Con frecuencia el uso de electrodos ordinarios producen fenómenos de polarización que enmascaran los resultados, por ello, se utilizan los electrodos impolarizables que consisten de un tubo de cobre embutido en un vaso poroso que contiene una solución

saturada de sulfato Cu con cristales. Tubo y vaso están cubiertos por una cubierta de caucho o plástico, menos la parte inferior que queda al descubierto y es la que hace contacto con el terreno. Cuando una corriente atraviesa el electrodo descompone una pequeña parte del sulfato, pero esta última se renueva inmediatamente por la disolución de una cantidad equivalente de la misma sal presente en el recipiente en forma de cristales, de forma que la disolución del sulfato queda siempre a la misma concentración evitándose así la polarización del electrodo.

5.3.2 MÉTODO DE LAS LÍNEAS EQUIPOTENCIALES

En capítulos anteriores se dio una semblanza general de este método; aunque se redunde al respecto: el método de líneas equipotenciales se está utilizando para localizar cuerpos que tengan propiedades eléctricas anómalas.

Al introducir dos electrodos en el suelo y aplicarles un voltaje exterior se establecerá de uno a otro electrodo, un flujo de corriente a través del suelo. Si el medio por donde pasa la corriente es homogéneo en sus propiedades eléctricas con respecto a la línea que une los electrodos.

Cualquier falta de homogeneidad en estas propiedades dará lugar a distorsiones en las líneas de flujo de corriente, y su presencia puede indicar la existencia de una masa interna dotada de una conductibilidad tan alta que atraiga las líneas de flujo, o de una tan baja que rechace las líneas de flujo hacia el medio circundante ver figura 5.9.

Como no existe medio directo alguno que permita medir la dirección del flujo de la corriente eléctrica en el suelo, se hace uso del principio general de que las líneas de flujo son siempre perpendiculares a las líneas de igual potencial (equipotenciales) como se aprecia en la sección vertical de la fig. 5.10 A. La diferencia de potencial o voltaje aplicado a los electrodos A y B se distribuye en la distancia que las separa, como se indica con la línea de rayas. Suponiendo que el medio sea homogéneo, se ve que al potencial con respecto a A, a lo largo del plano vertical corta a la superficie C, a mitad de camino entre A y B => tendrá en B la mitad de su valor.

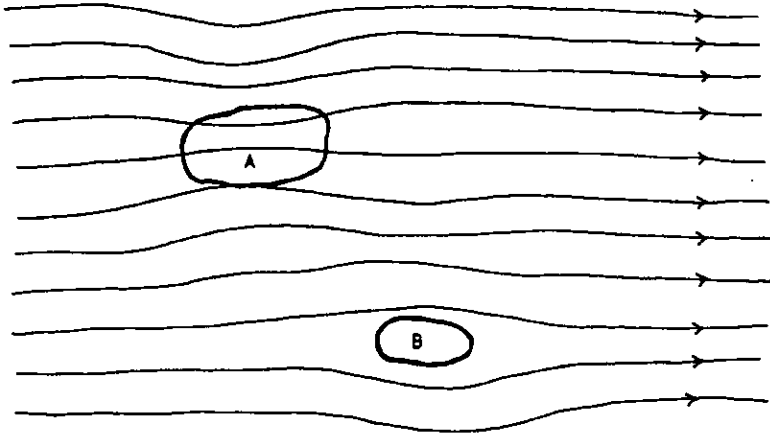


FIG. 5.9 DISTORSIÓN DE LAS LÍNEAS DE FLUJO DE CORRIENTE POR MASAS QUE TIENEN CONDUCTIBILIDADES A; ANÓMALAMENTE ALTA, O B, ANÓMALAMENTE BAJA. (VER REFERENCIA 2)

Las curvas equipotenciales tienen que ser siempre perpendiculares a las de flujo de corriente, puesto que ninguna componente de la corriente puede circular en punto alguno, siguiendo la curva equipotencial en ese punto. De aquí que cualquier irregularidad en las líneas de flujo aparezca como una distorsión de las curvas equipotenciales Ver. Fig. 5.10B.

Equipo y operaciones de campo. En las exploraciones por equipotencial, se introduce energía en el suelo mediante un par de electrodos separados unos 600 m entre los cuales un potente generador de gasolina mantiene un voltaje de 200 voltios. Las posiciones de estos electrodos permanezcan fijas durante la exploración.

Las líneas equipotenciales son trazadas sobre la superficie con un par de electrodos de prueba (que son generalmente varillas de acero forradas de cobre) insertados en el terreno. Uno de los electrodos de prueba permanece en una posición fija entre los electrodos primarios, y se mueve el otro hasta que se observe no pasa corriente entre él y el electrodo de prueba fijo. La figura 5.11 muestra la disposición empleada.

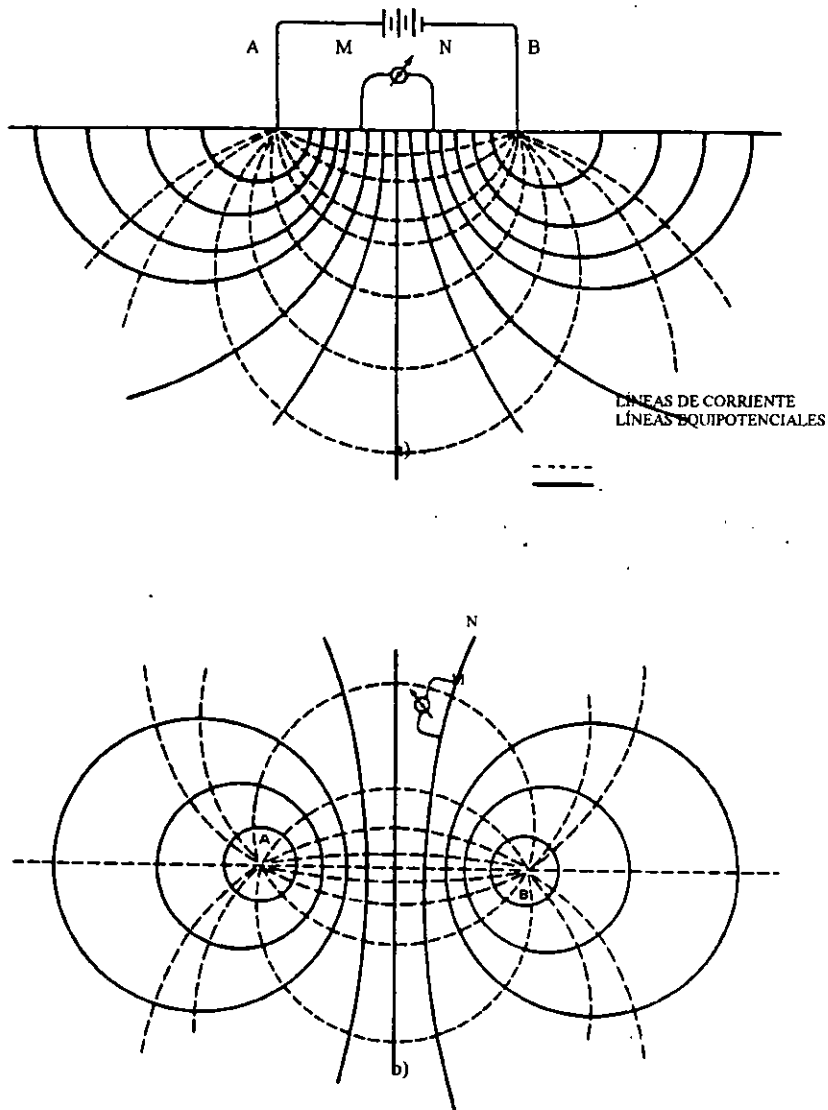


FIG. 5.10. LINEAS EQUIPOTENCIALES Y LINEAS DE FLUJO. a) POR DEBAJO DE LA SUPERFICIE DEL SUELO, EN EL PLANO VERTICAL DE LOS ELECTRODOS. b) EN EL PLANO DE LA SUPERFICIE DEL SUELO. LOS ELECTRODOS ESTAN SITUADOS EN A y en B. (VER REFERENCIA 2)

La distorsiones de las curvas equipotenciales son aprovechados para localizar masas. Tales como las de minerales de conductibilidad anormalmente alta o baja hasta una profundidad que no exceda de 15 m. La interpretación es casi siempre enteramente cualitativa.

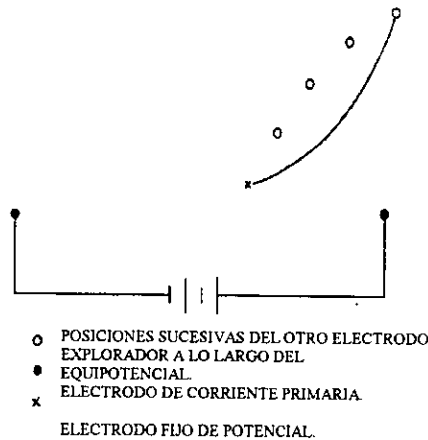


FIG. 5.11 LOCALIZACIÓN DE LAS LINEAS DE EQUIPOTENCIAL MEDIANTE ELECTRODOS DE EXPLORACIÓN (VIASTA EN PLANTA). (VER REFERENCIA 3)

5.3.3 MÉTODOS POR RESISTIVIDAD

El método por resistividad esta basado, en esencia, en el mismo principio que el de las líneas equipotenciales, pero es mucho más valioso porque proporciona una medida cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo.

El procedimiento básico consiste en medir el gradiente de potencial en la superficie, asociado a una corriente de intensidad conocida que circula por el suelo. Las irregularidades de la conductibilidad por debajo de la superficie influyen en la relación entre corriente y la caída de potencial en la superficie.

Este método se fundamenta en que todos las técnicas por resistividad de uso general, requieren la medida de la *resistividad aparente*.

Para comprender este concepto supongamos un sólido semiinfinito con resistividad uniforme ρ . También supongamos que en este material se introduce una corriente I mediante electrodos situados en A y B, respectivamente, sobre la superficie Ver figura 5.12.

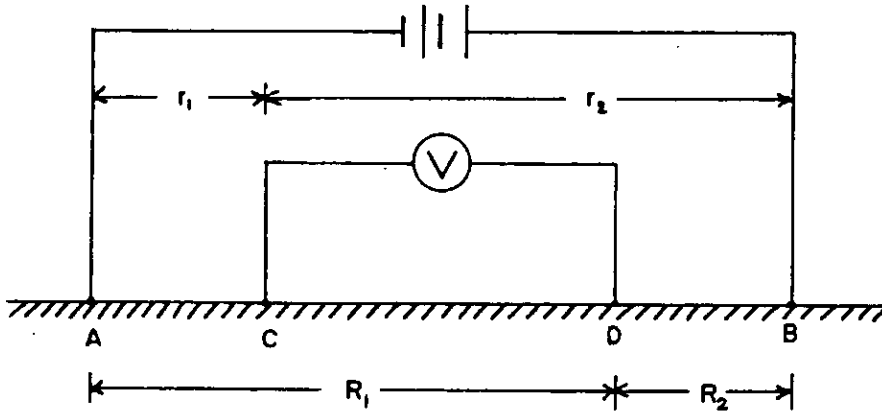


Figura 5.12. DISPOSICIÓN DE LOS ELECTRODOS DE CORRIENTE (A y B) Y DE LOS ELECTRODOS DE POTENCIAL (C y D).

Supongamos también, que el gradiente de potencial asociado a esta corriente es medido entre otros dos electrodos C y D sobre la misma superficie. El potencial en el electrodo C será

$$V_C = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{Ec. 5.28}$$

en donde r_1 es la distancia entre el electrodo de potencial C y el electrodo de corriente A, y r_2 su distancia al electrodo de corriente B. De modo análogo, el potencial en el electrodo D es

$$V_D = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Ec. 5.29}$$

en donde R_1 es la distancia de D a A y R_2 la distancia de D a B. La diferencia de potencial V medida con un potenciómetro entre los electrodos C y D es, sencillamente $V_C - V_D$

Restando las anteriores ecuaciones y despejando ρ tenemos :

$$\rho = \frac{V}{I} \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{V}{I} K \quad \text{Ec. 5.30}$$

donde:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Este valor es independiente de las posiciones de los electrodos y no es afectado cuando son intercambiados los electrodos de corriente y de potencial. Cuando la resistividad no es constante a través del medio, la resistividad efectiva calculada empleando la ecuación anterior, varía con el nombre de *resistividad aparente*. Donde K resulta ser una función dependiente del tipo de dispositivo empleado.

Este concepto se utiliza generalmente cuando se tienen, por ejemplo un subsuelo formado por dos capas, la superior con una resistividad ρ_1 , y la inferior con una resistividad ρ_2 menor que ρ_1 . La corriente entre los electrodos A y B no discurrirá según arcos circulares, como sucedería en un suelo homogéneo, pero en este caso las líneas de flujo están deformadas hacia abajo como se ve en la figura 5.13 por que la mayor conductibilidad por debajo de la superficie de contacto facilita el paso de la corriente en el interior de abajo, hasta el infinito, la corriente en el interior de la zona más profunda. Si el material de arriba se extendiera hacia abajo, hasta el infinito, la corriente total es más intensa. Además, cuanto más profunda esté la superficie de contacto, menor será el aumento en el flujo de corriente, mientras que cuanto mayor sea la separación de los electrodos en comparación con la profundidad y la superficie de contacto, mayor será el efecto ejercido por el estrato de bajo resistividad (ρ_2) sobre la corriente que circula entre los electrodos.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

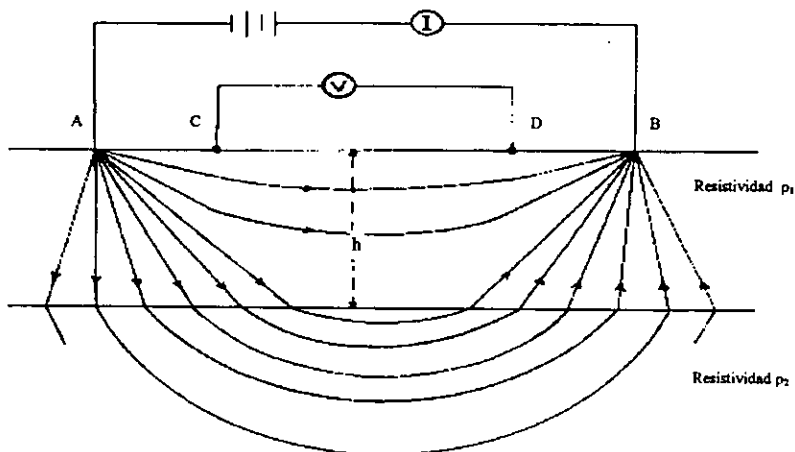


FIG 5.13 LINEAS DE FLUJO DE CORRIENTE ENTRE LOS ELECTRODOS A y B EN UN SUELO FORMADO POR DOS CAPAS, TENIENDO LA CAPA MÁS PROFUNDA MAYOR CONDUCTIBILIDAD. (VER REF 2

5.3.5 SONDEO ELECTRICO VERTICAL SEV

Es el método eléctrico más empleado en la actualidad. Tomando un punto del terreno como estación, se procede a realizar una serie de lecturas con distintos valores del parámetro, característico del dispositivo empleado. A medida que el parámetro aumenta, y por tanto se hace mayor la apertura del dispositivo, la información que recibimos corresponde a profundidades mayores. De aquí el nombre de *sondeo vertical*.

Para la realización de un SEV, sin exigir una gran exactitud, bastaría de disponer de un voltímetro, un miliamperímetro, cuatro barrenas metálicas (como electrodos), una batería de pilas secas y cable en longitud suficiente. El miliamperímetro debe ser capaz de medir intensidades de unos 100 m.A, a fondo de escala y debe tener Shunts para poder ampliar el margen de medida.

Hay que tener cuidado al tomar las lecturas en el voltímetro, de haber corregido el potencial espontáneo, llamando así al debido a corrientes eléctricas naturales. Hay instrumentos que llevan un dispositivo incorporado para la compensación de estos potenciales.

Se pueden corregir las lecturas, midiendo el potencial espontáneo en el voltímetro, cuando no esta conectada la batería, y posteriormente restando esta cantidad a las medidas realizadas, o bien con un circuito auxiliar incorporado en el instrumento, del que se toma una tensión igual y opuesta al potencial espontáneo. De esta forma se lleva el voltímetro a cero.

El trabajo en campo, normalmente, dado el gran número de ábacos disponibles para la posterior interpretación se utiliza el dispositivo Schlumberger. El operador de campo lleva con sí una tabla donde están las lecturas que ha de realizar, ver tabla 5.2 de ejemplo.

OBSERVADOR:		PERFIL I SEV						
OBSERVACIONES:								
Estación	AB/2	MN	(mA)	volt	ΔV	$\Delta V/I$	Ω	OBS
1	2	1	5.3	3V	2,500	500	5900	
2	3	1	5.8	3V	1,000	172.5	4740	
3	4	1	4.7	1V	280	59.5	2640	
4	5	1	6	300mV	142	23.65	1835	
5	6	1	8	100mV	79	9.85	1100	
6	8	1	6	30mV	13.2	2.2	440	
7	10	1	5.8	10mV	2.9	0.99		
8	13	1	10.5	10mV	6.8	0.647	343	
9	16	1	10	10mV	3.9	0.39	314	
10	20	1	10	3mV	2.4	0.24	301	
11	25	1	13	3mV	2	2	301	

En la columna primera se anota el número de la lectura efectuada; en la segunda el parámetro del dispositivo en metros; en la tercera la distancia entre los electrodos de medida MN; en la cuarta, la intensidad de corriente leída en el amperímetro; en la quinta la escala empleada en la lectura del voltímetro; en la sexta el valor de la diferencia de potencial ΔV en milivoltios; y en la séptima el valor del cociente $\Delta V/I$. Posteriormente se procederá a la representación gráfica de los resultados obtenidos.

Interpretación y curvas patrón. Desde el comienzo de los SEV se han venido utilizando una serie de métodos de interpretación que se han ido abandonando sucesivamente por otros mejores, aquí se utilizan los métodos de Orellana y Mooney que son buenos y sencillos de aplicar.

Los datos tomados en las hojas de campo se reflejan en un gráfico, en el que se llevan en ordenadas las resistividades aparentes, y en abscisas la distancia que hay entre uno de los electrodos de corriente y el punto 0 de sondeo ($OA = OB = AB/2$). Las escalas tomadas en ambos ejes son logarítmicas, para que la forma y tamaño de la curva sean independientes de las unidades utilizadas en las mediciones. El módulo del papel logarítmico es de 62.5 mm.

Para hallar la magnitud de la resistividad para que la curva entre dentro del intervalo que se tome en el eje de ordenadas.

El papel empleado es transparente para facilitar la interpretación, mediante las curvas patrón, por superposición, obteniendo por lectura directa la resistividad y el espesor de la capa superficial, cada gráfico es la representación de un sondeo.

La curva está dibujada por puntos, que corresponden a cada estación, habiéndose unido los puntos mediante trazos continuos, ver figura 5.14. Se observan en ella tres tramos escalonados produciéndose estos escalones al cambiar la distancia MN.

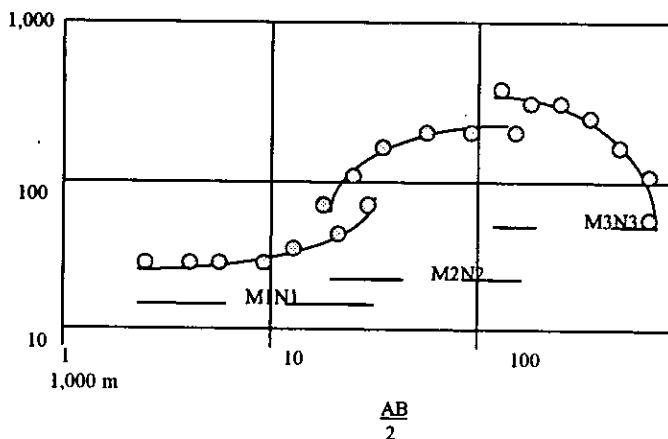


FIG. 5.14

Tales escalones se suavizan adecuadamente antes de hacer la interpretación. Se debe insistir en que los datos obtenidos en el campo han de ser lo más exactos que se pueda y obtenidos con aparatos de una cierta sensibilidad, para que las curvas, sobre las que se van a sacar las conclusiones del estudio, se acerquen lo más posible a la realidad.

Otro factor que hay que considerar antes de decidirse a hacer un estudio de este tipo, es comprobar que el terreno que se está estudiando cumple las hipótesis que sirven de base para el cálculo de las curvas patrón. La primera hace referencia a que las discontinuidades en el subsuelo han de ser horizontales. Si el contacto tiene un buzamiento hasta de 10 a 15°, puede subsanarse orientando la línea de electrodos paralela al arrumbamiento de las formaciones.

La segunda indica que no han de existir variaciones laterales de resistividad. Se recomienda a no ser que se conozca positivamente la inexistencia de este tipo de discontinuidad, hacer dos SEV perpendiculares en cada estación, o dos paralelos ligeramente separados.

Las diferencias obtenidas son debidas a las discontinuidades y se reflejan con saltos en las curvas que si no son muy bruscos se pueden suavizar al dibujar la curva. También se recomienda el empleo de corriente continua, pues así se han calculado las curvas patrón.

Como último factor a tener en cuenta esta la importancia que tiene el dibujar en el campo las curvas ya que en ellas se advierten errores cometidos por discontinuidades laterales, fugas de corriente, mal contacto de los electrodos, y se puede repetir el sondeo, si así conviene.

Para el dibujo de la curva, las abscisas de los puntos las tomamos de la segunda columna de la hoja de campo, y las ordenadas habría que determinarlas mediante la ecuación que da la resistividad aparente para el dispositivo Schlumberger, aplicándola a cada estación.

Obtención de las curvas patrón

Las curvas patrón se obtienen según un modelo físico simplificado. Se hacen una serie de suposiciones, ya nombradas anteriormente, como son: terreno horizontal, contactos entre distintas capas horizontales, y la última capa de espesor infinito.

Curvas tipo

Para curvas de una capa, si representamos como siempre, en abscisas abertura de ala $AB/2$ y en ordenadas las resistividades aparentes, la curva sería una recta paralela al eje de abscisas en el punto.

$$\rho = \rho_1$$

Para dos capas, la curvatura comienza tangente a la resistividad ρ_1 de la primera capa, y tiende asintóticamente hacia la resistividad de la segunda capa ρ_2 .

Se agrupan estas curvas en dos grandes familias según sea $\rho_1 < \rho_2$ o $\rho_1 > \rho_2$ uno y otro tipo están representados en la figura 5.15

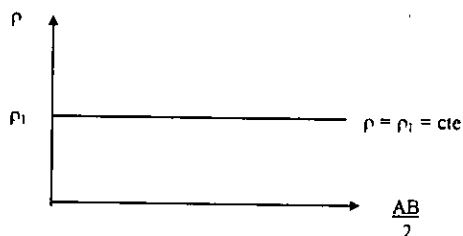


FIG. 5.15 CURVA DE UNA SOLA CAPA

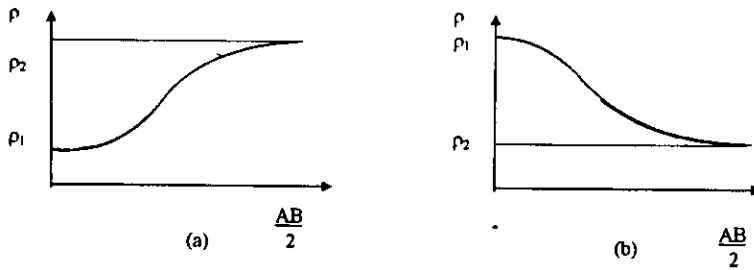


FIG. 5.15 CURVAS DE DOS CAPAS

Las curvas de tres capas, se caracterizan por que un porcentaje elevado de ellas tienen un máximo o un mínimo, ó 3 puntos de inflexión, no siempre apreciables, que se corresponden con los cuatro cambios de concavidad-convexidad de la curva. En el caso de que no presenten estas particularidades, la experiencia del interpretados es la única regla para encajarlas con acierto dentro de este grupo de tres capas.

Se clasifican en cuatro tipos siguientes :

- Tipo H para $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$
- Tipo K para $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$
- Tipo A para $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$
- Tipo Q para $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

Los tipos H y K presentan siempre un mínimo y un máximo respectivamente , ver figura 5.16

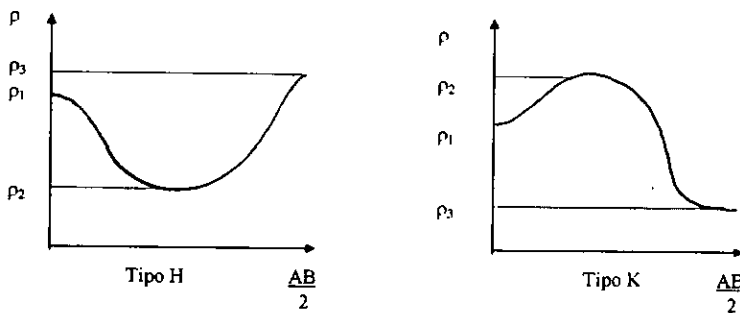


FIG. 5.16 CURVAS DE TRES CAPAS

La curva comienza igual que para dos capas, tangente a la resistividad ρ_1 de la primera

capa, y acaba asintótica a la resistividad ρ_3 de la tercera, pasando generalmente por un mínimo o un máximo, que refleja la tendencia de la curva hacia la resistividad de la segunda capa. Hay que considerar que el valor del máximo o mínimo no da la resistividad de la capa intermedia, puesto que solamente una fracción de corriente pasa por esta capa, pero sí nos da una referencia al indicarnos que ρ_2 es menor que la resistividad del mínimo, o que es mayor que la resistividad del máximo.

Para los tipos A y Q, las curvas tienen una forma ascendente y descendente respectivamente. Hacemos la misma consideración para el tramo inicial y final de la curva y, en cuanto al central, a veces se observan en él cambios de curvatura que son consecuencia de que la curva tienda a la resistividad de la capa intermedia. De ahí lo dicho de que la curva pueda presentar tres puntos de inflexión, pues ha de cambiar cuatro veces la curvatura, ver figura 5.17

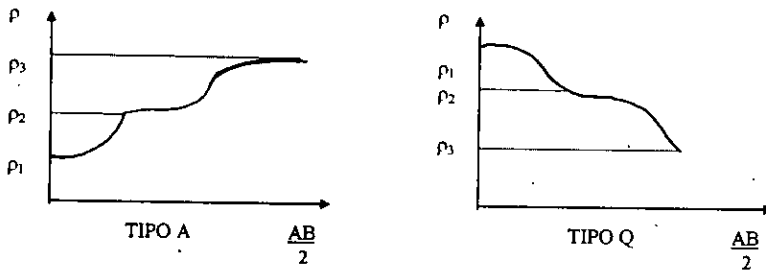


FIG. 5.17 CURVAS DE TRES CAPAS

Nótese que la variación central de la curva no siempre existe, lo que dificulta su clasificación, y consecuentemente su interpretación, que puede dar lugar a interpretarla como una curva de dos capas.

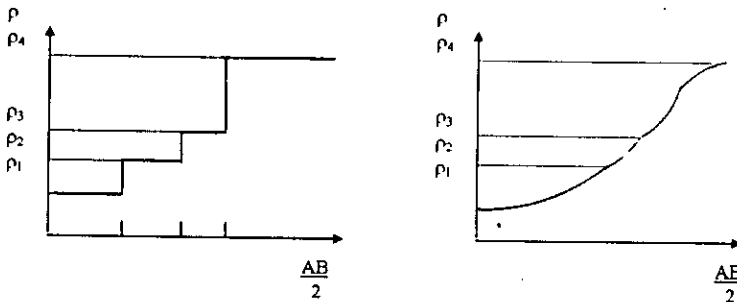
Las curvas de cuatro capas admiten una clasificación siguiendo el método empleado para la de tres capas.

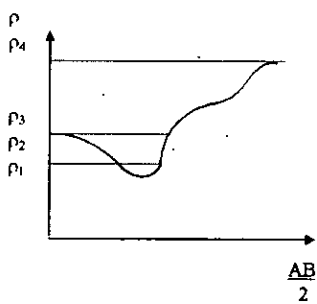
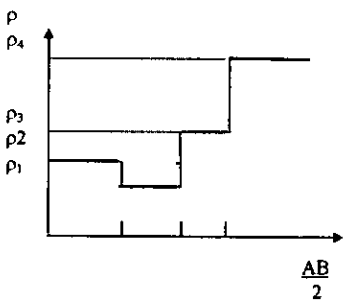
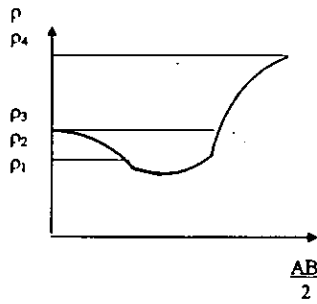
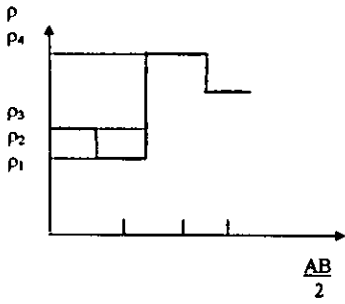
Orellano - Mooney distinguen los ocho tipos siguientes:

HK, KH, QH, AK, HA, KQ, QQ, AA.

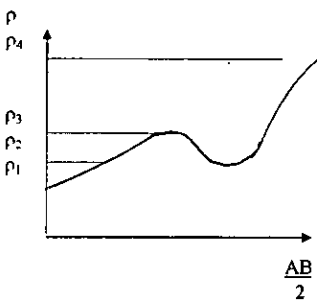
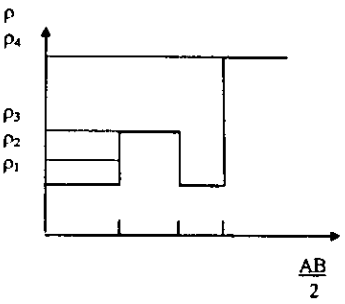
Donde, por ejemplo, al tipo AA pertenecen las que cumplen que $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$, ver figura 5.18

A las de tipo HK aquéllas en que que $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$, ver figura 5.19





En las de tipo KH se verifica que $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$, ver figura 5.20



5.4. DISPOSICIÓN DE ELECTRODOS Y PROCEDIMIENTOS DE CAMPO

En la práctica se emplean varias configuraciones diferentes en las superficie, para las series de electrodos son colocados a lo largo de una línea. Los electrodos de corriente se disponen generalmente, pero no en todos los casos, por fuera de los electrodos de potencial, si bien es teóricamente equivalente la disposición inversa.

Separaciones entre los electrodos fijos y variables: Para efectuar las medidas por resistividad existen dos procedimientos de campo generales: en una de ellas se mantienen fijas todas las separaciones entre los electrodos, y toda la dispersión de electrodos es desplazada con esta separación constante, de un lugar a otro, obteniendo la resistividad aparente en el punto medio y dibujando después, a base de estos datos, las curvas sobre el plano del área que interesa. El otro tipo de medición es manteniendo fijo el centro de la disposición de electrodos y aumentando su separación hasta alcanzar el máximo de penetración deseada. Este método localiza las discontinuidades horizontales en la conductibilidad y hace posible determinar la profundidad a que se encuentran.

5.4.1 DISPOSICIÓN WENNER

Cada electrodo de potencial esta separado del electrodo de corriente más próximo un tercio de la distancia existente entre los electrodos de corriente (Ver figura 5.21.a). Para esta disposición la expresión de la resistividad aparente se transforma en :

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} = K \frac{V}{I} \quad \text{Ec. 5.31}$$

donde:

$$K = 2\pi a$$

5.4.2 MÉTODO DE DISTRIBUCIÓN DE LEE

Es una variante de la disposición de Wenner, en el cual se disponen en el centro del despliegue un electrodo adicional de potencial E (Fig. 5.21.b). Los diferencias de potencial son medidos primero entre los electrodos B y E, disposiciones asimétricas

$$\rho = \frac{V}{I} 6\pi a \quad \text{Ec. 5.32}$$

5.4.3 DISPOSICIÓN TRIELECTRODO

Resulta otra variante de la disposición de Wenner, en el cual el espaciamento de los electrodos adyacentes más exteriores. Se emplea un sistema conmutativo para intercambiar cíclicamente al funcionamiento de los electrodos individuales, designando a C como electrodo de corriente y a P como electrodo de potencial. En la primera disposición los

electrodos tienen el siguiente arreglo CPPC o PCCP que dan resultados idénticos, y en la segunda disposición el arreglo es el siguiente CAPP o PPCC, y en la tercera disposición los respectivos tipos alternan a lo largo de la línea en secuencia más información que la deducida de una sola lectura para cada montaje de electrodos.

5.4.4 SISTEMA SCHLUMBERGER

Consiste en aumentar la separación entre electrodos aumentando la distancia entre los electrodos de corriente, o entre los de potencial, pero solo una cada vez, en el curso a una distancia infinitesimal, y los valores observados del potencial son ajustados por extrapolación para acomodarlos a este supuesto. La disposición de los electrodos esta representada en la figura 5.21.d.

$$\rho = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{L^2 - l^2}{l} \cdot \frac{V}{I} \quad \text{E c. 5.33}$$

5.5 INTERPRETACIÓN

La interpretación cuantitativa de los datos de resistividad ha sido objeto de estudios matemáticos durante varios decenios: la teoría hasta ahora elaborada puede ser aplicada a modelos sencillos, tales como el de capas múltiples separadas unas de otras por superficies de contacto planas, y preferiblemente horizontales; pero es raro que las formaciones de rocas próximas a la superficie del suelo presenten una estratificación tan sencilla en sus propiedades eléctricas. Las variaciones en la resistividad suelen ser mucho mas complejas tanto en la dirección vertical como en la horizontal.

No obstante a estas dificultades, en algunos casos que se presentan en la naturaleza pueden ser interpretados con bastante aproximación mediante un cuadro de estratificación sencilla. Cuando hay sobre la roca firme un recubrimiento no consolidado, puede ser posible calcular la profundidad hasta la roca firme, con bastante exactitud a base de las medidas de resistividad empleando las fórmulas aplicadas al caso de dos capas.

Algunas masas minerales de conductibilidad anómala pueden ser representadas como esfera o esferoides, y calcular sus dimensiones y profundidad a que se encuentran a partir de los datos de resistividad empleando expresiones matemáticas elaboradas para estas formas geométricas.

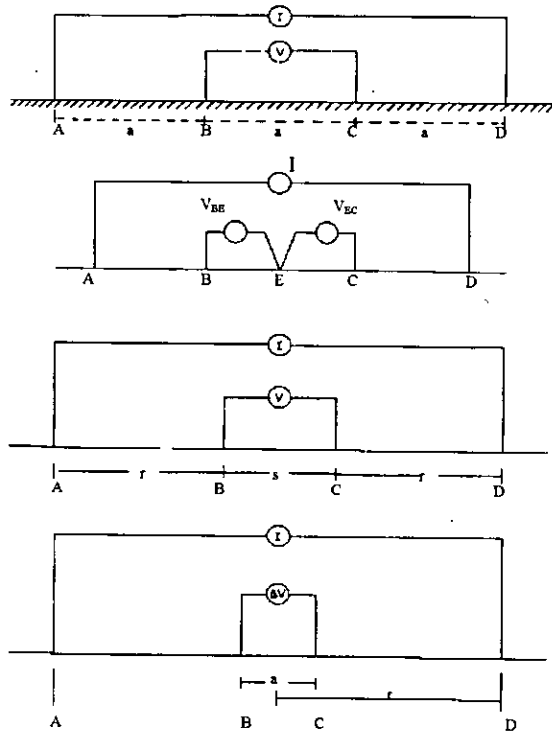


FIG. 5.21 Configuraciones de electrodos. a) Disposición Wenner; a es el espaciamento empleado en los cálculos de resistividad. b) distribución de Lee. c) Distribución Trialectrodo con interruptor en posición CPPC. d) Disposición Schlumberger, a es constante y r aumenta.

5.5.1 MEDIOS ESTRATIFICADOS CON SUPERFICIES SEPARACIÓN HORIZONTALES

La configuración más sencilla para un tratamiento teórico es la formada de capas discretas, cada una con resistividad uniforme, pero diferente y separadas unas de otras por capas planas horizontales. Hummel ha elaborado la teoría para los casos de dos y tres capas. Este procedimiento se basa en la premisa de que existe un número infinito de orígenes de corriente en las posiciones de las imágenes especulares de los electrodos tal como lo reflejaría ópticamente los planos de discontinuidad. Como cada reflejo implica una pérdida de intensidad y los reflejos sucesivos corresponden a fuentes de corrientes

distantes, solo hay que tomar en consideración el efecto de estos pocos múltiples primeros para obtener un valor utilizable para el potencial.

En el caso de una capa superficial de resistividad ρ_1 que cubre un sustrato de espesor indefinido de resistividad ρ_2 , la resistividad aparente ρ_a es:

$$\rho_a = \rho_1 \left(1 + 4 \left[\frac{K}{1 + (2h/a)^2} - \frac{k}{4 + (2h/a)^2} \right] + \right. \\ \left. + \left[\frac{K^2}{1 + (4h/a)^2} - \frac{K^2}{4 + (4h/a)^2} \right] + \right. \\ \left. + \left[\frac{K^3}{1 + (6h/a)^2} - \frac{K^3}{4 + (6h/a)^2} \right] + \dots \right)$$

Ec. 5.34

en donde a es la separación entre electrodos, h el espesor de la capa superior, y k el contraste de resistividad, definido por la fracción $(\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$. Representa esto una suma infinita cuyo término enésimo tiene la forma:

$$4 \rho_1 \left[\frac{k^n}{1 + (2nh/a)^2} - \frac{k^n}{4 + (2nh/a)^2} \right] \quad \text{Ec. 5.35}$$

Como k es menor que la unidad, se ve que los términos se aproximan a cero a medida que n aumenta y, por lo tanto existe un límite para el número de términos necesario para alcanzar la precisión que se desea.

Con la disposición de electrodos de Wenner, la resistividad aparente medida en el campo es, sencillamente, $2\pi a (V/I)$. Cuando se determina ρ_a para un campo de valores de las cantidades h y k pueden ser encontradas comparando las curvas de ρ_a/a observadas con las curvas teóricas basadas en diversas condiciones supuestas de estratificación.

Tagg ha construido una serie de curvas basadas en la Ec. 5.34 que facilitan el calculo de las resistividades y espesor de las capas para el caso de dos capas. Estas curvas están reproducidas en la fig. 5.15 ; una serie para $\rho_2/\rho_1 > 1$ y la otra para $\rho_2/\rho_1 < 1$.

5.5.2 INSTRUMENTOS

Se puede utilizar corriente Continua o Corriente alterna. Cuando se emplea corriente continua los aparatos de medición son Potenciometros; son dos los motivos por los que la corriente continua no se utiliza normalmente, la primera es que los electrodos de potencial suelen ser electrodos impolarizables para evitar el tener que compensar las corrientes extrañas de polarización que se producen en ellos, cuando son piquetas metálicas, la segunda se debe a que las corrientes naturales que circulan en el interior de la Tierra (corrientes telúricas) producen una lenta variación en la diferencia de potencial entre los electrodos lo que afecta a las mediciones.

En los métodos de corriente alterna, la repartición de los potenciales no está regida por las mismas leyes y tiene algunos inconvenientes en su empleo, aunque también otras ventajas, como no tener que usar electrodos impolarizables, sin embargo, casi toda la prospección eléctrica por resistividades se efectúa con instrumentos que generan corriente alterna ya que las diferencias de potencial de origen electroquímico y las corrientes teluricas ambas se eliminan al ser unidireccionales.

Es muy conveniente el empleo de corriente alterna de baja frecuencia ya que de no ser así los resistividades observados pueden diferir de las obtenidas empleando corriente continua. Esto se debe a la inductancia y capacitancia del subsuelo así como a efectos más complejos debidos a la frecuencia, tales como la polarización inducida que para frecuencias de unas decenas de ciclos por segundo, llegan a alcanzar gran importancia.

El instrumento más útil y portátil es el Tellohm Soil Resistance Meter. La corriente alterna se suministra a través de los dos electrodos externos, las diferencias de potencial medidas por un potenciometro, está incorporado al circuito de electrodos de corriente, de esta forma no es necesario medir por separado la intensidad de corriente y la diferencia de potencial para obtener un valor de la resistencia, ya que el potenciometro puede calibrarse en ohmios. La ventaja de emplear un método potente del suelo a los electrodos de potencial, y por lo tanto la resistencia entre éstos y el suelo no está incluida en la resistencia total de la medida. La corriente esta suministrada por cinco pilas de 1.5 voltios y un vibrador la transforma en corriente alterna de 110 ciclos/seg⁻¹. Esta corriente pasa a los electrodos a través de un transformador, pudiendo obtenerse un máximo de 150 voltios eficaces. Este circuito incluye el potenciometro a través del cual se deriva una serie de resistencias que permiten aumentar el campo de medición del instrumento. La corriente de equilibrio obtenida del potenciometro va a los electrodos de potencial a través de un transformador y de un circuito rectificador sincrónico que incluye un sensible galvanómetro. El campo de medición del instrumento comprende de 0.3 Ω a 10,000 Ω a fondo de escala con una precisión de más menos 1% del valor del fondo de la escala empleada. En general resulta ser satisfactorio. Para lograrse la máxima exactitud en la medida de la resistencia de contacto entre los electrodos de corriente y el terreno debe ser pequeña, siendo 300 Ω el valor máximo recomendado.

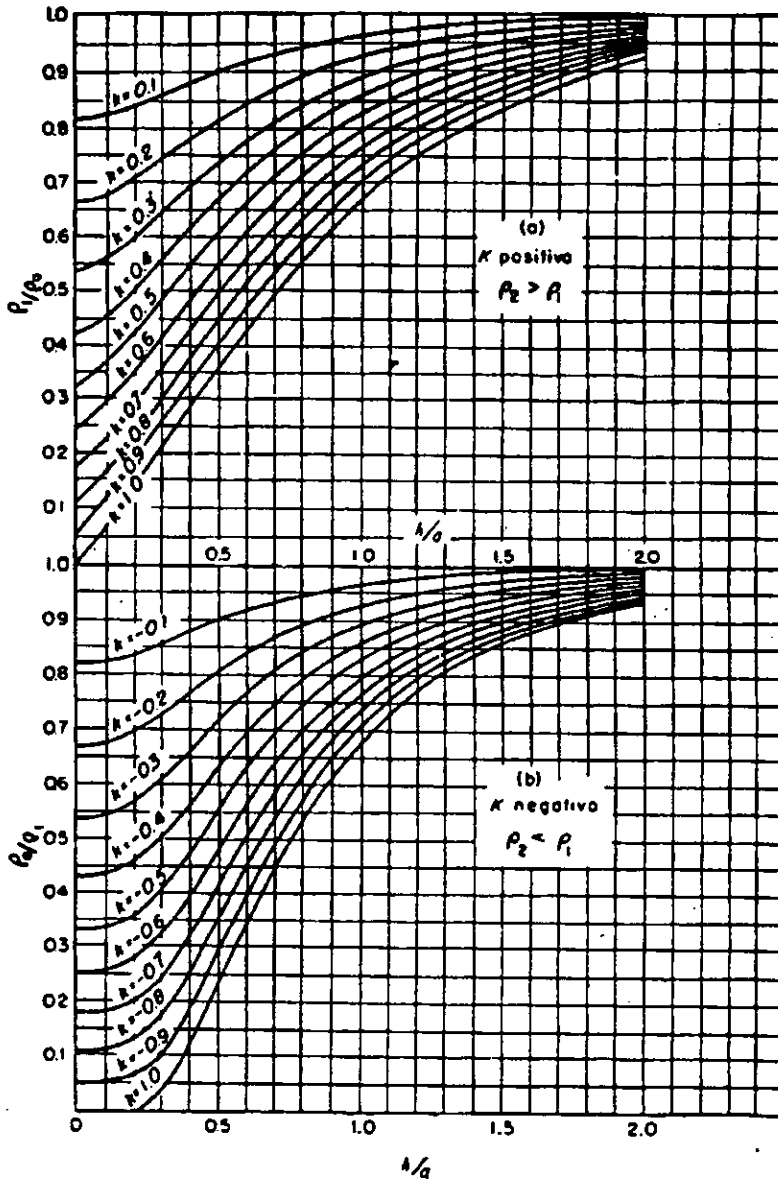


FIG. 5.22 Curvas de Tagg para casos de dos capas en los que (a) la capa superior tiene menor resistividad que la capa inferior, y (b) la capa superior tiene mayor resistividad. K es $(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$, en donde ρ_1 es la resistividad de la capa superior, y ρ_2 la de la capa inferior. La escala de abscisas es h/a (espesor de la capa/separación de electrodos).
 (Según Tagg, *Trans. Am. Inst. Mining Met. Engrs.*, 1934.)

Otro instrumento conocido con el nombre de Geophysical Megger puede generar alrededor de tres o más veces la potencia del Tellohm en condiciones normales de trabajo. Tiene la ventaja de trabajar con frecuencia más baja, variando esta entre 10 y 20 c/seg⁻¹. Los valores 0.3 Ω a 30 Ω con una precisión de más menos 1% del valor del fondo de la escala empleada. Puede emplearse para investigaciones a profundidades del orden de un centenar de metros. Comparando con el Tellohm presenta mayor peso y menor campo de medición.

El ABEM Terrameter, también utiliza frecuencia baja (4c/seg⁻¹), por lo que puede emplearse para mayores profundidades de investigación que comprendidas entre 0.01 y 10,000 Ω . El circuito esquemático muestra como la corriente suministrada por el oscilador E pasa por los electrodos de corriente a través de un transformador T. En el circuito del secundario de T y en serie con los electrodos de corriente se encuentra una resistencia R de la cual, por medio de una conexión deslizante, puede derivarse una señal Vr. Al efectuar una medida, al amplificador A se conecta primero a los electrodos de potencial y su amplificación se ajusta de forma que la señal Vx de una conveniente en la escala M. La entrada del amplificador se conecta a Vr tomada del potenciómetro R, y la conexión deslizante se ajusta hasta obtener la misma lectura en la escala M, entonces Vx = Vr. Puesto que la corriente a través de R y a través del terreno es la misma, se deduce que la resistencia del suelo Vx/I es igual a la resistencia de R hasta el punto desde el que se toma la derivación para Vr.

Para investigadores a mas de 30 m de profundidad el Terrameter esta más indicado que el Tellohm.

CAPITULO VI

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y SU INFLUENCIA EN LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

6.1 ESTRUCTURAS GEOLOGICAS

El término estructura geológica se emplea para describir las masas rocosas considerando las tres dimensiones. La corteza terrestre esta constituida por una gran diversidad de estructuras geológicas, las cuales varían desde estructuras de grandes dimensiones como, por ejemplo, una placa continental o una cuenca oceánica, hasta elementos pequeños como un plano de estratificación en un fragmento de roca que pueda sostenerse en la mano. Las estructuras principales están compuestas por un conjunto de otras pequeñas, las cuales han sido formadas por los procesos de sedimentación, intrusión magmática, deriva continental, así como el ascenso y descenso del nivel de la superficie terrestre en diferentes lugares. Las estructuras pueden tener límites bien definidos entre sí o pueden pasar gradualmente de un tipo a otro.

La unidad estructural fundamental de las rocas sedimentarias se denomina capa o estrato. Es un estrato una clase particular de roca, pero aunque el término se aplique estrictamente a las rocas sedimentarias, a veces se utiliza para cualquier tipo de roca con estructura en forma de estratificación. Por lo general, los sedimentos se acomodan en forma de capas horizontales sobre el lecho oceánico. Un grupo de tales capas se llama formación y, a menudo, esta compuesta de distintos tipos de roca como lutitas, areniscas y calizas. La palabra secuencia también se utiliza para designar un grupo de rocas que guardan una relación entre sí.

Después de millones de años de sedimentación el movimiento ascendente del lecho oceánico eleva las rocas, dando lugar a la formación de las características topográficas; este movimiento provoca que las formaciones de rocas sobresalgan del plano horizontal, como las estructuras en forma de domo. Entonces, se dice que las capas buzan, es decir tienen echado e inclinación hacia debajo de la horizontal. En un domo las capas buzan radialmente hacia fuera de la cima. La compresión de la corteza terrestre provoca que las capas se plieguen formando estructuras denominadas anticlinales y sinclinales, ver figura 6.1

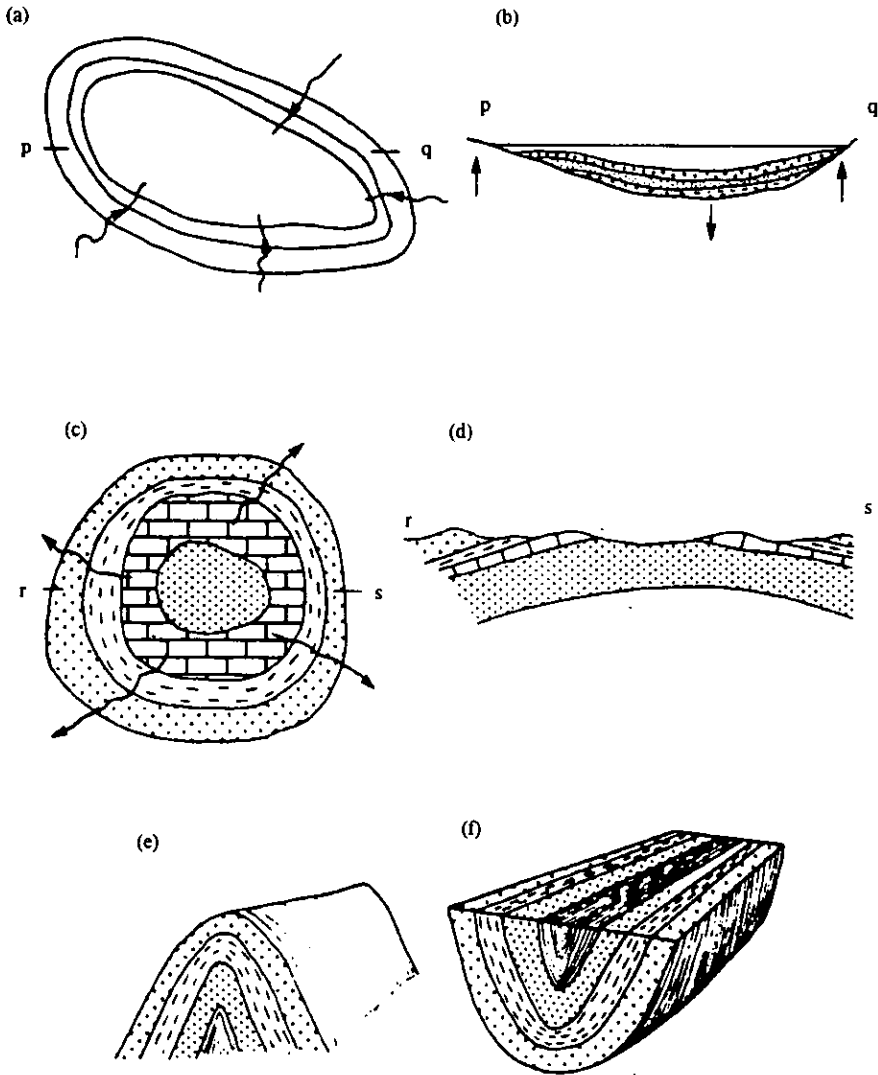


Figura 6.1. Estructuras geológicas de plegamiento: a) cuenca de deposición; b) sección transversal de la cuenca; c) domo; d) sección transversal del domo; e) anticlinal; f) sinclinal. (Ver referencia 4)

6.2 BUZAMIENTO

Es una de las estructuras geológicas fundamentales. Se define como el ángulo que forma con la horizontal: la dirección de esta pendiente con respecto al norte también se debe medir. El echado, también llamado buzamiento, se mide con un clisímetro, el cual se coloca sobre el plano de estratificación de un afloramiento de roca dura; con la brújula se mide el rumbo. Para las rocas suaves, que no tiene una superficie dura sobre la cual apoyar el clisímetro, se utiliza el método de la alineación visual a cierta distancia, haciendo coincidir la orilla del instrumento con los planos de estratificación. Así mismo, se pueden medir los niveles con un nivel fijo corriendo un itinerario que abarque el afloramiento completo y, luego, calcular la pendiente promedio. Un ejemplo de echado puede ser 40° NO 45° , cuyo significado es que las capas forman un ángulo de 40° hacia debajo de la horizontal y un azimut de 45° (rumbo noreste). La línea que forma un ángulo recto con la máxima pendiente de la capa de roca se llama rumbo. Esta línea horizontal sobre la superficie de la roca fig. 6.2.a. El rumbo también es la dirección de los bordes de las capas; se puede comparar también con las vetas de madera por la semejanza que tiene ésta con una estructura estratificada, como las rocas sedimentarias. El echado se define como el ángulo máximo de inclinación de la capa rocosa, pero hay valores menores de echado en otras direcciones, donde la inclinación decrece a medida que la dirección considerada se dirige hacia el rumbo, a lo largo del cual el echado, por definición, es por supuesto igual a cero (figura 6.2.c).

Cualquiera de estos pequeños ángulos de echado recibe el nombre de echado aparente en la dirección respectiva. El término se refiere a la apariencia del buzamiento en las capas al hacer un corte vertical. A distancia es imposible estar seguros de que la inclinación observada representa el valor máximo de la pendiente. Las capas con inclinación hacia el observador o en dirección opuesta parecerán horizontales. Desde otras direcciones, la pendiente tendrá un valor entre el máximo y cero. Las capas muestran su máxima inclinación cuando la visual es paralela a la dirección del rumbo.

El objeto de medir el echado es obtener información total sobre la posición tridimensional de las formaciones rocosas que se encuentran bajo la superficie, así como de aquellas partes de las mismas que son visibles. Los afloramientos aislados de un tipo de roca en particular pueden estar conectados bajo la superficie o pueden ser parte de diferentes capas.

La figura 6.3 muestra una de las posibilidades de la forma en que los afloramientos pueden tener continuidad bajo la superficie como parte de la combinación de un anticlinal y sinclinal. El arco del anticlinal se erosionó y ya no existe, pero el sector sinclinal se encuentra bajo la superficie. Este es un ejemplo del análisis estructural que los geólogos hacen después que se ha llevado a cabo el levantamiento de una zona, identificando las clases de roca y tomando lecturas de rumbos y echados. Si las capas desaparecen bajo la superficie, el análisis estructural se llevará a cabo mediante la estimación de la profundidad de la capa en otros lugares.

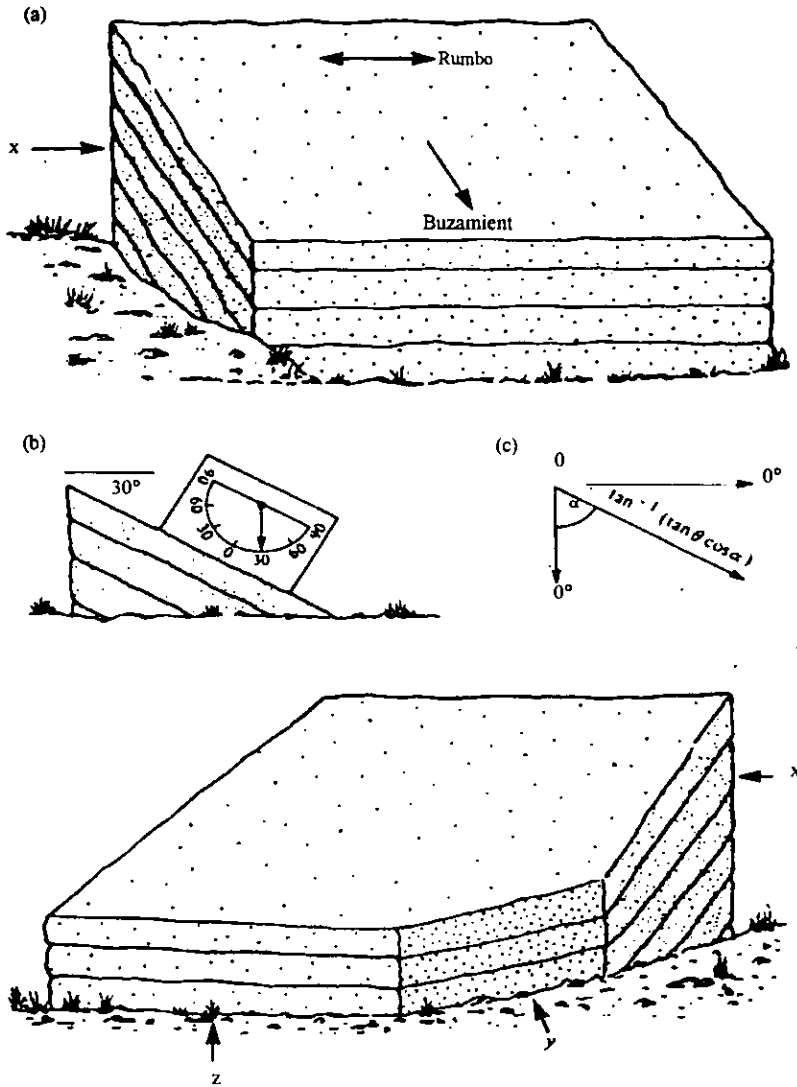


FIG. 6.2 Buzamiento. a) Rumbo y echado. Si se observa el afloramiento por enfrente de las capas éstas parecen horizontales, pero el ángulo verdadero del echado se ve desde x. b) el clisímetro marca 30°. c) Cálculo del echado aparente. d) La inclinación de las capas parece disminuir si el observador se mueve en el sentido x-y-z. (Ver referencia 4)

El análisis puede tener la finalidad de estudio científico o económico, por ejemplo, cuando la capa es un manto de carbón. Para determinar si es económicamente explotable será necesario calcular la profundidad del manto en otros lugares, con el objeto de conocer la extensión bajo la superficie. La profundidad de un depósito mineral bajo la superficie es un factor crítico en el análisis de costos de un proyecto de explotación minera.

La figura 6.3.c indica cómo se calculan las profundidades cuando se conoce el echado. Se supone que la estructura es plana; si la capa es curva, el echado varía en la zona en estudio y los cálculos no serán precisos. La precisión se comprueba mediante sondeos en diferentes lugares, con lo cual se obtienen las diferentes profundidades del manto de carbón, por ejemplo.

Hay varias razones por las cuales un manto específico no se localiza a la profundidad esperada. La figura 6.3.d ilustra tres de ellas: el echado puede haber cambiado, el manto de carbón pudo haber adelgazado hasta cero; o fallas o fracturas pudieron haber desplazado las capas en varias direcciones.

Es común que las lecturas de los echados no sean constantes en todo el afloramiento ya que las capas no son planos perfectos, sino superficies curvas e irregulares. Se puede obtener un valor promedio a partir de varias lecturas. Este no es un cálculo simple del promedio de los ángulos del echado por que incluye la dirección azimutal del echado en cada caso.

El echado verdadero también se puede calcular a partir del echado aparente medido en distintas direcciones. Un mínimo de dos lecturas dará la solución, pero será mejor hacer varias mediciones en frentes de exposición vertical como cantiles o en excavaciones como los cortes de carreteras a partir de los resultados de sondeos. Hay varios métodos para calcular el echado a partir de lecturas del echado aparente.

6.3 PLIEGUES

Las estructuras plegadas se deben a la compresión dentro de la corteza terrestre generada por el movimiento lateral de los continentes. Los estratos en la zona de compresión se pliegan en forma de estructuras corrugadas (fig. 6.4.a). Los plegamientos son provocados por esfuerzos que van de ligeros hasta muy fuertes. Cuando la intensidad es muy alta, las formaciones de roca se someten a esfuerzos superiores al límite elástico y se rompen. Este proceso se llama fallamiento y, también, cuando las rocas se cizallan debido a al compresión y ocurre un traslape.

Cuando todos los planos axiales del pliegue son paralelos entre sí, el plegamiento se denomina isoclinal. El plegamiento es una de las causas de las discontinuidades de las rocas. Un material plástico como la arcilla puede ajustarse por sí mismo a las distorsiones que se originan durante el plegamiento, se expandirá en las crestas de los pliegues y se adelgazará como resultado de la compresión en los flancos.

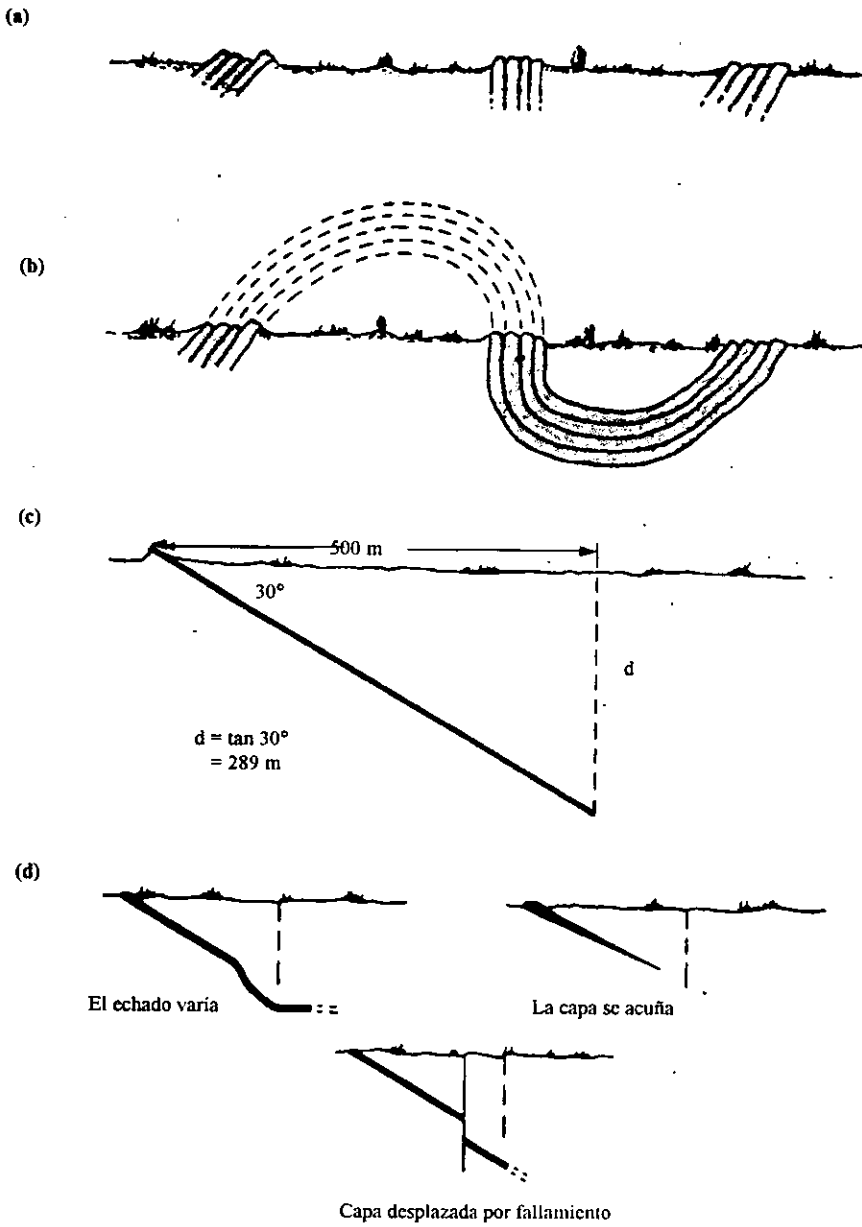


FIG. 6.3 a) Afloramientos. b) Estructura probable: el anticlinal (izquierda) cambia a sinclinal (derecha) con un flanco central y vertical. c) Cálculo de la profundidad de una capa en el subsuelo. d) Tre razones para no encontrar una capa a la profundidad esperada. (Ver referencia 4)

La causa fundamental de la distorsión es que la longitud del arco aumenta gradualmente conforme se aleja el centro del pliegue. Si el volumen del material permanece constante, la capa se debe hacer más delgada o se debe desplazar una cantidad mayor de material desde los flancos hacia arriba. Finalmente, si actúan intensas fuerzas de compresión durante millones de años, la arcilla puede convertirse en pizarra. Las rocas duras como las calizas o las areniscas tienen un comportamiento diferente. Como son cuerpos rígidos se fracturan, dando lugar a una gran cantidad de discontinuidades. Sumando todos los anchos de las discontinuidades darán una cantidad aproximadamente igual al excedente de la longitud del arco. La figura 6.4.c ilustra los detalles de este modelo de fracturamiento.

El análisis de las rocas sometidas a compresión indican que están sujetas a un campo de esfuerzos, el cual puede representarse por tres componentes: la fuerza lateral activa, que es la que causa la distorsión; la fuerza de confinamiento lateral, debida a la rigidez de la corteza terrestre en el lugar correspondiente, y la fuerza de gravedad, con dirección vertical hacia el centro de la Tierra. Esta fuerza incluye el peso de la roca, desde donde se produce el fenómeno hasta la superficie. Cuando la fuerza lateral activa supera las otras dos, la masa total de roca es forzada o empujada hacia arriba, formando pliegues y expandiéndose lateralmente (fig. 6.4.d). Este movimiento lateral provoca la formación de fisuras perpendiculares a los ejes de los pliegues; por esta razón, se observan a menudo superficies de roca suave cortando transversalmente los ejes de los pliegues y haciéndolos aparecer exactamente como se presentan en los dibujos.

El análisis de los modelos del fracturamiento y plegamiento de las rocas permite a especialistas de geología estructural deducir la historia del plegamiento de las rocas en una región. Esto generalmente indica que el proceso no ha sido un evento único en el tiempo, sino que ha habido una serie de movimientos espaciados y, con frecuencia, en diferentes direcciones. Una serie de tales movimientos queda registrada en las rocas en forma de conjuntos de modelos de fracturamiento. Los fragmentos de rocas rotas en forma natural muestran formas geométricas definidas: planas, rectangulares o romboédricas. Las estructuras de pliegues y fallas que se forman al mismo tiempo son las principales causas de las discontinuidades que estudian los ingenieros especializados en geotecnia.

6.4 FALLAS

Cuando las rocas se pliegan por compresión o se estiran por tensión pueden soportar una cierta cantidad de distorsión, pero finalmente se rompen. Las grietas de las rocas se llaman fallas. La figura 6.5 muestra las principales clases de fallas. El movimiento total de una falla puede llegar a ser de miles de metros en fallas muy grandes o del orden de milímetros, en este caso recibe el nombre de microfallas. Las fallas tienen estrechos vínculos con las fracturas y, con frecuencia, son paralelas. En una falla ha habido rompimiento y desplazamiento, mientras que en una fractura no ha habido movimiento a través del plano de discontinuidad (figura 6.5.f).

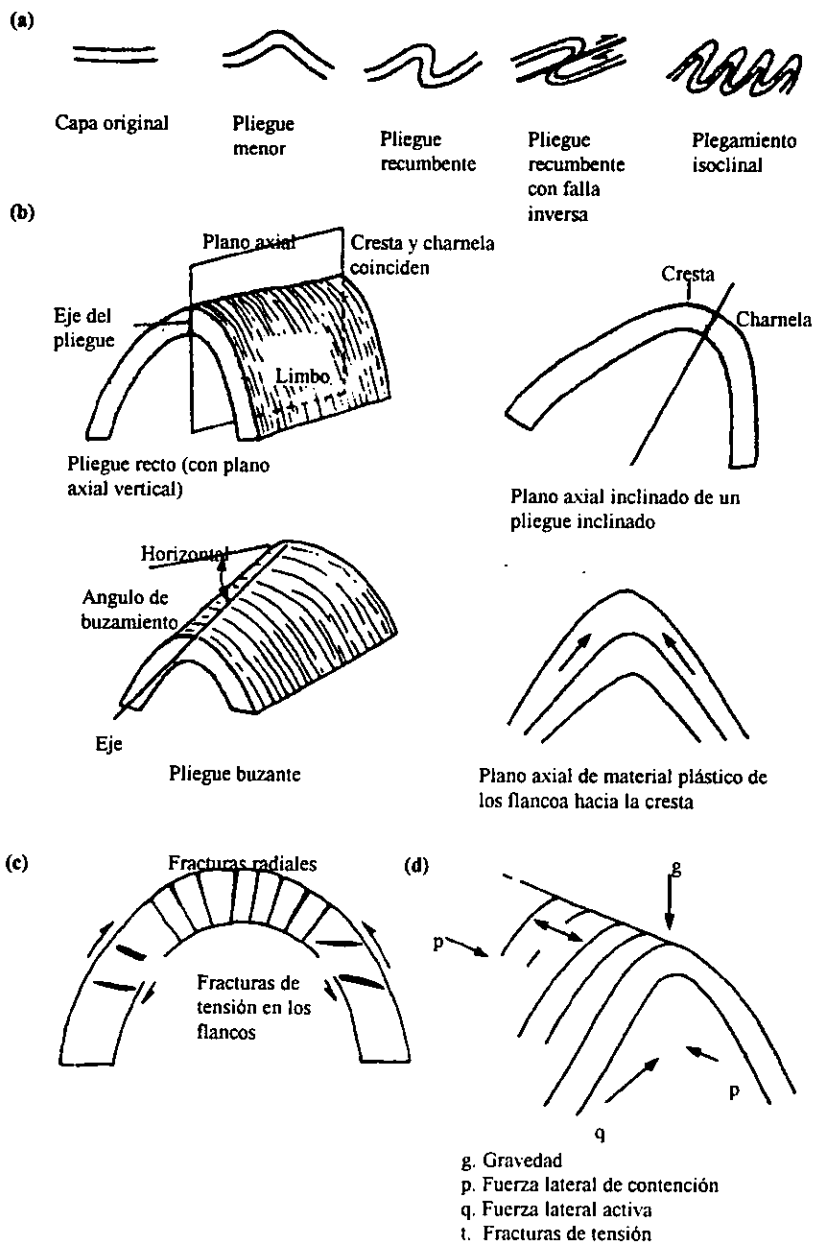


FIG. 6.4 Plegamientos: a) intensidad progresiva del plegamiento; b) Elementos estructurales de los pliegues; c) sistema de diaclasas en un pliegue; d) fuerzas que operan durante el plegamiento. (Ver referencia 4)

El incremento de la compresión provoca el rompimiento de la roca, dando origen a una falla inversa (fig.6.6.a) . El ángulo (θ) del buzamiento del plano de la falla es bastante pequeño para una falla inversa, por lo general , menos de 45° . La tensión en una formación de roca también puede producir fallas, concretamente normales (fig. 6.6.b). Estas fallas por lo general, tienen un ángulo grande, mayor de 45° . El plano por donde se rompe la roca, denominado plano de falla, a veces tiene estriaciones que indican la dirección del movimiento de las dos masas de roca.

Dichas estriaciones del plano de falla son una de las propiedades de las rocas que sirven para describir las que se utilizan en ingeniería. El plano de falla se puede describir mediante geometría tridimensional; el movimiento total se puede considerar como la resultante de tres vectores mutuamente perpendiculares. La figura 6.6.c muestra estos vectores. El movimiento vertical (vector AB) se llama desplome, el vector horizontal frontal (BC), separación, y el vector horizontal lateral (CA'), desplazamiento horizontal lateral. El caso general se ilustra con componentes de movimiento a lo largo de cada una de las tres direcciones. Las fallas también pueden tener movimientos simples; una falla vertical no tiene desplazamiento horizontal ni separación y el plano de falla es vertical. Si el movimiento ha tenido lugar casi por completo en una solo a dirección horizontal, se producirá una falla de torsión (también llamada desgarre o transcurrente). Todas las fallas causan desplazamiento de las capas y se les puede detectar con facilidad en el terreno.

Cuando se estudia de cerca una roca que esta a punto de producir una falla, se observan con frecuencia numerosas fallas pequeñas con orientación similar, pero con caída vertical de sólo unos cuantos metros o centímetros. Estas estructuras con sistemas paralelos y, con frecuencia, también las fracturas (fig. 6.6.f), afectan considerablemente la estabilidad de las rocas cuando se hacen excavaciones en las mismas o cuando la erosión ha dejado pendientes pronunciadas. Los diagramas de las fallas sugieren que los planos de falla son suaves. Por lo general, sólo las fallas menores son suaves con un plano de falla pulido y con estriaciones; la zona donde se ha producido el movimiento principal es a menudo una masa de roca que recibe el nombre de polvo de roca; dicha zona puede tener hasta cien metros de ancho. Esta masa rocosa, fragmentada y triturada en la zona de falla, se interperiza con facilidad y contiene comúnmente muchos poros o espacios, los cuales se rellenan con agua durante la temporada de lluvias o con agua subterránea si la zona es profunda. El agua en estas zonas de falla puede fluir con mucha rapidez debido a la alta permeabilidad de la roca triturada. Esto ha provocado muchos desastres en las minas cuando los túneles atraviesan estas zonas de falla. Las fallas pueden provocar tambien desprendimientos de rocas en los túneles

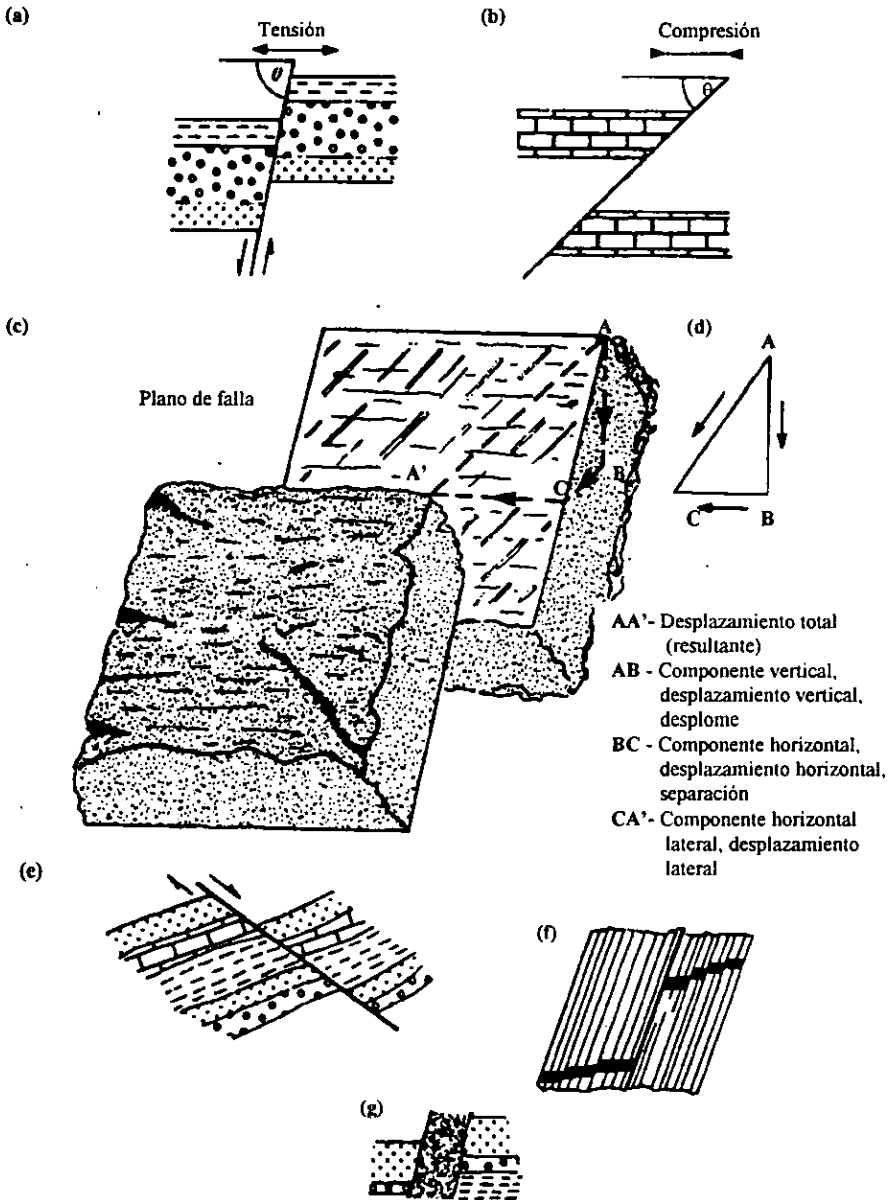


FIG. 6.5 a) Sección vertical a través de una falla normal; b) sección vertical a través de una falla inversa; c) componentes vectoriales de un movimiento de falla; d) sección vertical a través de una falla; e) una falla de torsión causa desplazamiento de los estratos; f) fallas menores y fracturas paralelas a la falla principal; g) brecha de falla en zona de falla. (Ver

6.5 DIACLASAS

Las diaclasas son planos de debilidad en las rocas duras; también se pueden encontrar en rocas suaves muy comprimidas como la arcilla (arcilla sobreconsolidada). Estos planos generan, comúnmente modelos geométricos regulares (fig. 6.5.f), de tal manera que cuando la roca se rompe en el frente, los fragmentos producen formas distintivas que pueden ser: rectangulares, prismas con sección triangular, romboédricas y piramidales.

La diferencia entre una diaclasa y una falla es que en la primera no ha habido movimiento a lo largo del plano de debilidad. Cuando las rocas se someten a esfuerzos se generan modelos o sistemas de fracturas y, finalmente, ocurre algún movimiento a lo largo de las mismas dando origen a una falla. Esto es el resultado de la concentración de los esfuerzos a lo largo de un solo plano, el cual se convierte en un plano de falla. El proceso es similar a lo que sucede cuando los metales se someten a esfuerzos superiores al límite elástico. Las rocas están sometidas a esfuerzos durante millones de años y si se expanden, se forman diaclasas que permiten que el agua se mueva a través de la roca, transportando y depositando minerales en solución y rellenando las fracturas. El cuarzo es un mineral de relleno que se encuentra comúnmente en las diaclasas de areniscas: la calcita en las de las calizas. Ambos minerales desarrollan vetas de color blanco lechoso, las cuales presentan frecuentemente modelos o sistemas geométricos regulares en relación con los campos de esfuerzo que han sido activos en el pasado. Estos sistemas de diaclasas permiten a especialistas reconstruir los eventos pasados que han deformado las rocas. En ocasiones quedan registrados varios eventos aislados, en los que los esfuerzos han operado desde distintas direcciones.

6.6 DISCORDANCIAS

Una discordancia es una estructura geológica en la cual un conjunto de capas yace sobre los bordes inclinados de otro conjunto (fig.6.6). Hay una discordancia angular entre las dos formaciones o cuerpos de roca. La historia de esta estructura es la sedimentación de las capas e a la n seguida por un levantamiento del lecho oceánico, erosión de la superficie A-B y, luego, el hundimiento de la zona abajo del nivel del mar, seguido por más sedimentación, lo cual dio origen al grupo superior de rocas (w, x, y). Cuando se usan letras para designar estratos, se pone por lo general un guión en las mismas si hay dos grupos de roca separados por una discordancia en el área de trabajo. Las discordancias son de interés en las ciencias geológicas porque marcan una importante interrupción en la historia geológica de la zona en cuestión. Tuvieron lugar dos fases de sedimentación, separadas probablemente por decenas o, incluso, centenares de millones de años. Cualquier fósil conservado en la secuencia superior sería diferente de cualquiera de la secuencia inferior debido a los cambios evolutivos de las formas de vida. Las principales divisiones de la historia geológica. La importancia en la geotecnia de las discordancias esta relacionada con las notables discontinuidades que contienen; dichas discontinuidades son causadas por dos clases de roca muy distintas entre sí, pero que estan depositadas juntas. Pueden tener distinta permeabilidad y el plano de discordancia estar saturado con agua. La capa del fondo de la secuencia superior es a menudo, pero no siempre, un conglomerado que se denomina conglomerado basal. La razón de esto es que cuando se levanta una superficie de tierra, el mar ataca sus margenes y la erosiona hacia el interior. Los primeros depositos se formarán a

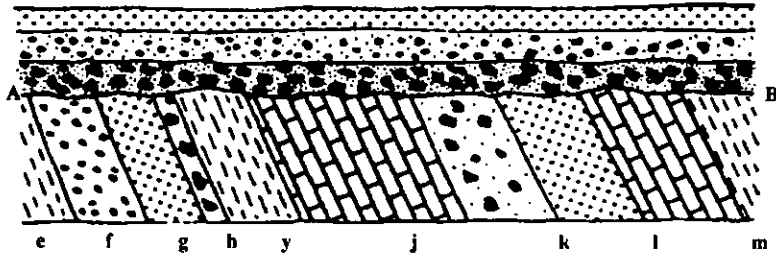
lo largo de la playa original: fragmentos. A medida que el mar avanza sobre los continentes, los primeros depósitos de fragmentos se localizan mar adentro, en una zona que recibe depósitos de grano más fino como arena o limo. Con frecuencia se observa una gradación bien marcada de material de grano grueso a grano fino, hacia arriba en una discordancia. Sobre el terreno, una discordancia se distingue por la intersección de los límites de dos distintas variedades de roca. El modelo nes similar al que se observa en una sección vertical de rocas que continen una discordancia (fig. 6.6.b).

6.7 ESTRUCTURA DE LAS ROCAS IGNEAS

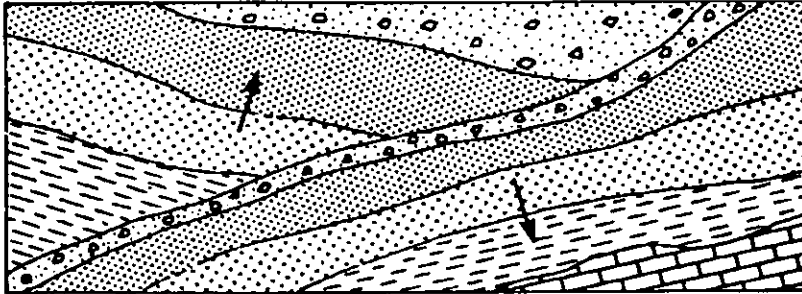
Las intrusiones ígneas constituyen otro grupo de las estructuras de rocas con dimensiones que varían desde miles de kilómetros hasta centímetros, desde batolitos hasta pequeñas vetas en otras rocas. Las masas muy grandes se llaman batolitos o plutones, formados en los núcleos de cadenas montañosas y que ahora son visibles por que la erosión los dejo al descubierto. Las intrusiones menores que derivande los batolitos se denominan stocks o cúpulas; son extensiones sobre la masa principal del batolito.

Las rocas ígneas que ocupan posiciones verticales se llaman diques: son como muros. Sus dimensiones también son muy variadas, hasta centenares de kilómetros de longitud y decenas de kilómetros de ancho. Los diques se han formado por la intrusión de magma en grandes fracturas de la corteza terrestre. Los diquestratos son estructuras predominantemente horizontales, pero hay un ángulo definido, bajo el cual un dique se convierte en diquestrato. El ángulo de cambio se puede considerar de 45° con respecto a la horizontal. El basalto forma también montes amplios que cubren inmensas extensiones planas de cientos de miles de kilómetros cuadrados. La importancia de estas estructuras para el ingeniero geotécnico radica en la posibilidad de que haya cambios repentinos en las propiedades de las rocas. Las rocas ígneas son generalmente muy duras y resistentes debido a que no tienen planos de estratificación como las rocas sedimentarias, las cuales, a menudo, se rompen con facilidad a lo largo de estos planos de debilidad o de la superficie de diaclasas regulares. La dolerita desarrolla por lo general patrones irregulares de diaclasas. Algunos cuerpos de granito, por lo contrario, poseen una estructura de pseudoestratificación cerca de la superficie debido a la formación de diaclasas al haber dilatación. Se pueden obtener agregados de los diquestratos y diques de todas las clases de rocas ígneas

(a)



(b)



(c)

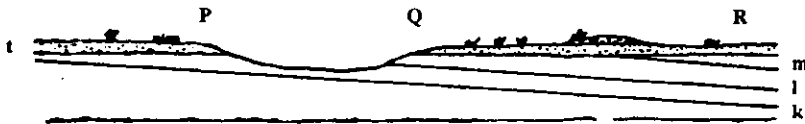


FIG. 6.6 Discordancias. a) Discordancia muy pronunciada. LA sucesión superior empieza con un conglomerado basal (w), seguido por arenisca angulosa (x) y arenisca de grano fino (y). La inferior es una sucesión sedimentaria de pizarra arcillosa, arenisca angulosa, arenisca y caliza estratificada (e-n) que ha sido inclinada, erosionada y cubierta por la capa superior. Los conglomerados basales contienen a menudo fragmentos de rocas de las sucesiones que cubren. A-B es la superficie de erosión. b) mapa geológico de un discordancia. Las flechas indican la dirección de los echados de las dos formaciones. c) Discordancia de poca inclinación, como se ve en los acantilados de las costas. En P, la capa (t) de la sucesión superior yace sobre la capa (k), pero en Q está sobre el estrato (l); en R yace sobre (m). (Ver referencia 4)

6.8 RASGOS TOPOGRÁFICOS

Se define como unidades de forma notable de la superficie terrestre, como montañas y valles, cantiles, estuarios, etc. Un conjunto de rasgos topográficos recibe el nombre de paisaje o fisiografía. Hay una relación muy estrecha entre la forma de aquéllos, la estructura de las rocas y las propiedades de intemperismo de las rocas que se encuentran bajo la superficie. El clima también es un factor muy importante en la determinación del tipo de rasgos topográficos que surgirán de un conjunto de rocas y para sus condiciones estructurales. Durante los últimos 30 años los ingenieros geotécnicos han utilizado más los estudios que se han hecho sobre las formas topográficas para estimar las propiedades geotécnicas de un sitio que se investiga antes de emprender la construcción. Dichas propiedades se refieren particularmente a la estabilidad del terreno bajo los sitios de construcción y a la prevención o control de deslizamientos, por ejemplo. Las grandes construcciones lineales como las carreteras, que requieren de un reconocimiento previo del terreno con el fin de elegir la ruta.

Hay muchas claves que advierten sobre futuros deslizamientos; la roca que sirve de soporte puede estar oculta en su totalidad por una cubierta de suelo producto del intemperismo y será necesario hacer sondeos para determinar el tipo de roca que se encuentra abajo. En climas áridos y húmedos, la consistencia de la roca determina el ángulo de la pendiente de la superficie y, por consiguiente, la forma superficial del terreno. Las rocas duras como las calizas y areniscas resisten y desarrollan curvas convexas, en contraste con las curvas cóncavas que originan las rocas suaves como la arcilla o las pizarras arcillosas. La consistencia relativa y la resistencia al intemperismo y erosión son los factores importantes. En climas húmedos, el perfil consiste de curvas suaves que cambian de cóncavas a convexas en puntos de inflexión, pero en climas áridos, el perfil es generalmente muy pronunciado, con intersecciones angulosas entre los distintos ángulos de la pendiente.

Los rasgos topográficos en regiones glaciales también presentan abruptos cambios angulosos entre los diferentes ángulos de la pendiente, pero dependen en mayor grado del lugar donde se haya acumulado el hielo que de la clase de roca, por que el hielo puede erosionar con facilidad rocas duras, especialmente cuando las rocas se han fragmentado notablemente por la fuerza de expansión del agua al congelarse. Cuando el hielo se funde y fluye hacia las zonas más bajas a medida que el clima se hace más templado y húmedo, los perfiles angulosos tienden a hacerse más redondeados.

Los ángulos de la pendiente se forman en rocas suaves, no consolidadas, dependen del tamaño del grano del material, la permeabilidad y el contenido promedio de humedad durante todo el año. Para cada conjunto de parámetros hay un ángulo de máxima pendiente que es estable, ya que en un determinado tamaño de grano y permeabilidad, la variable con respecto al tiempo es el contenido de agua de la roca. Cuando el terreno está saturado tiene un ángulo de reposo menor que cuando está seco, pero la relación exacta entre los factores variables es compleja y la tensión superficial entre líquido y sólido es crítica.

Cualquier rasgo topográfico en particular sufre un continuo proceso de cambio, aún cuando este puede ser extremadamente lento. El periodo total de historia de la erosión de los continentes puede ser descrita como una sucesión de juventud, madurez y senectud. En un

paisaje joven los agentes erosivos han actuado durante un tiempo relativamente corto sobre una masa de tierra que se ha elevado recientemente, como las pendientes son muy pronunciadas, la erosión actúa primordialmente hacia abajo. Con el transcurso de millones de años los valles se ensanchan, esta es la etapa de madurez en el ciclo de erosión. El paisaje en la etapa de senectud es casi plano de nuevo, con lomas ocerros aislados que sobresalen por encima de un plano que se encuentra casi al nivel del mar; los geomorfólogos denominan peneplanicie este paisaje.

6.9 INESTABILIDAD DE LAS ROCAS Y MOVIMIENTOS A LO LARGO DE PLANOS INCLINADOS

Las condiciones de inestabilidad son de diferente grado desde el colapso en un terreno provocando un agujero de aproximadamente 5 metros de diámetro bajo una edificación o un pequeño desprendimiento de roca de un acantilado o de la orilla de un río, hasta un enorme deslizamiento en el que gran parte de una montaña caiga gradualmente sobre un valle. Las causas de inestabilidad pueden ser inherentes a la naturaleza o al hombre. Los terremotos pueden causar deslizamientos de grandes proporciones en las montañas; las excavaciones hechas por el hombre, por ejemplo, los cortes para carreteras, son diseñadas de tal manera que el talud permanezca estable. El diseño se basa en el estado de intemperismo y estructura de la roca, por lo que se debe elegir entre un ángulo pequeño en el que la inestabilidad, si ocurre, no ocasione problemas y un ángulo que no requiera mucho movimiento de tierra, el cual aumentaría los costos de operación.

La inestabilidad puede ser continua y gradual o puede presentarse en fenómenos aislados, separados por 100 años o más. Los cortes que hace el hombre pueden permanecer por más de 50 años sin presentar dificultades, luego, repentinamente, se colapsan. La inestabilidad natural del terreno depende en gran medida de las condiciones del agua del subsuelo. Cuando la masa rocosa está seca, la fricción a lo largo de las discontinuidades es alta y la masa se hace inestable; en caso de aguaceros torrenciales, el nivel freático sube y aparece una fuerza modificadora que actúa en sentido opuesto a las discontinuidades. Si algún movimiento se iniciara en rocas duras como resultado de la fuerza de gravedad, se producirían deslizamientos a lo largo de discontinuidades abiertas, las que podrían ser rellenadas con arcilla húmeda, producida por el intemperismo de la roca.

En las rocas suaves hay un movimiento gradual de material por la pendiente, más rápido cuando el terreno está mojado, más lento cuando está seco. Cuando la arcilla está saturada se puede comportar como líquido, de ahí que se presentan corrientes de lodo que se desplazan a gran velocidad.

Un perfil de estabilidad se conforma por estos procesos naturales; por lo tanto, un corte realizado en esta pendiente natural es inherentemente inestable, ya que las fuerzas naturales comienzan a trabajar inmediatamente para suavizar el perfil de tal manera que se adapte al tipo de roca y clima, ver figura 6.8. El proceso puede durar cientos de años o sólo unos días. Cualquier estimación geotécnica para cortes de un tipo debe incluir mediciones de las pendientes naturales de la zona y reportes sobre cómo éstas varían con la clase de roca. La zona se debe de investigar buscando signos de inestabilidad, posiblemente mediante el uso

de fotografías aéreas y precisos itinerarios de nivelación para obtener planos con curvas de nivel a intervalos pequeños que se puedan incluir en los mapas que se tengan de la zona.

La arcilla es un material cohesivo y posee la capacidad de soportar ángulos muy pronunciados, a veces casi verticales si esta seca y la altura de corte es tal que la carga de la base es mayor que la fuerza de cizallamiento de la arcilla, otras masas de arcilla son muy inestables. Las razones de esta diferencia se encuentran en la microestructura de la arcilla, en sus fracturas o variaciones de permeabilidad de diferentes partes de la masa rocosa total; es necesario encontrar el origen del agua que hace que la arcilla se desplace.

Hay diversidad de opiniones entre los que hacen los levantamientos geológicos con respecto al nombre de la roca para este tipo de material de grano fino. Algunas capas de arcillas calcáreas se presentan tan endurecidas que se describen como fangolitas. Estas pueden ser casi impermeables cuando están en el subsuelo, y al excavar se rompen en grandes bloques de material duro, pero después de un corto periodo de exposición a una atmósfera húmeda absorberán agua y se fragmentarán en pequeñas piezas. Esto muestra lo que se puede esperar que suceda sobre la superficie de un corte como un proceso de lenta, pero de continua deterioración. Las variaciones en el grano de endurecimiento de las arcillas calcáreas pueden ser causadas cuando los componentes de hierro o el sulfato de calcio provocan una cementación parcial. Tales variaciones debidas a las causas naturales en el momento del depósito no se consideran por lo general durante el levantamiento geológico normal, en el cual se indica que el afloramiento completo esta compuesto por margas.

Las arcillas negras también han creado problemas en climas húmedos después de 50 o más años de estar expuestas en corte sin ninguna inestabilidad.

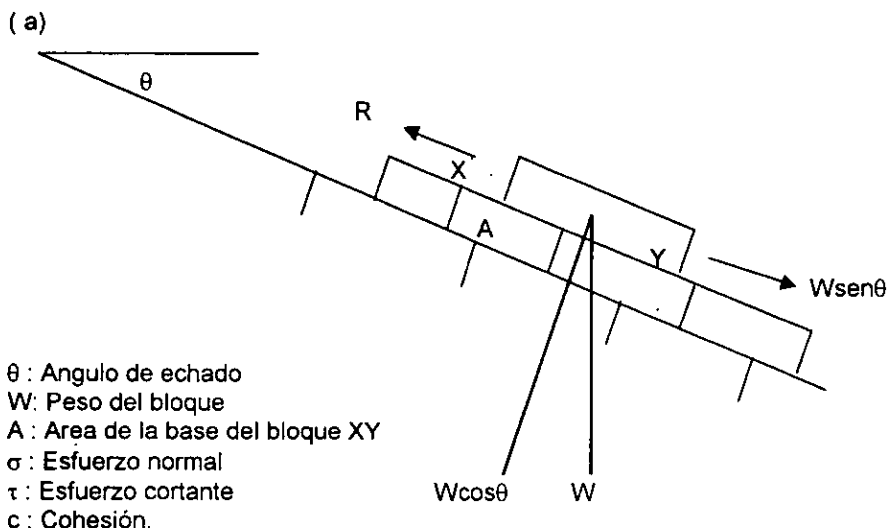
Una posible causa que origine problemas es la gradual oxidación del sulfuro de hierro a sulfato, con la expansión consecuente y la pérdida gradual, muy lenta, de arcilla hacia el interior de la superficie expuesta, la que a su vez permite que el agua superficial penetre a mayor profundidad y suministre el oxígeno requerido para los procesos químicos. Entonces la masa total de arcilla que está en corte se puede volver inestable. Pequeñas variaciones climáticas también pueden ser la causa en problemas en las arcillas y en todas las clases de rocas.

Los factores fundamentales que controlan la estabilidad de las rocas, el coeficiente de fricción, la resistencia al esfuerzo cortante, la resolución de fuerzas en componentes vectoriales y los momentos de fuerzas con respecto a un punto o línea, son tratados por la Mecánica de Suelos.

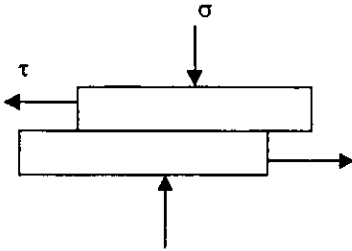
La aplicación de la teoría de la fricción estática y de deslizamiento basada sobre un bloque de material bien conocido, en una superficie inclina u horizontal, y la deducción del coeficiente de fricción (μ) y el ángulo de fricción (ϕ), donde $\mu = \tan\phi$ al análisis de todas las fuerzas que operan dentro de una masa de roca es complicada por la naturaleza del material, a menudo, variable de la superficie en cuestión.

El tamaño del grano es muy importante en la determinación del comportamiento posterior; se especifican dos categorías principales de material no consolidado: suelo granular de grano grueso (también denominado suelo de fricción) y el suelo cohesivo de grano fino como la arcilla. La consistencia del suelo granular se desarrolla por las fuerzas de fricción entre los granos donde se tocan mutuamente, lo cual depende de la forma de cada grano, la distribución por tamaños y el arreglo de los granos o compactación. El arreglo depende de las condiciones de sedimentación en el momento de la formación y en algún grado, por la presión a que se sometió posteriormente la capa. El comportamiento de la arcilla es diferente debido a otras fuerzas, por ejemplo, las electrostáticas y las de tensión superficial, que unen los cristales individuales de arcilla, la microestructura de las arcillas es muy importante aquí.

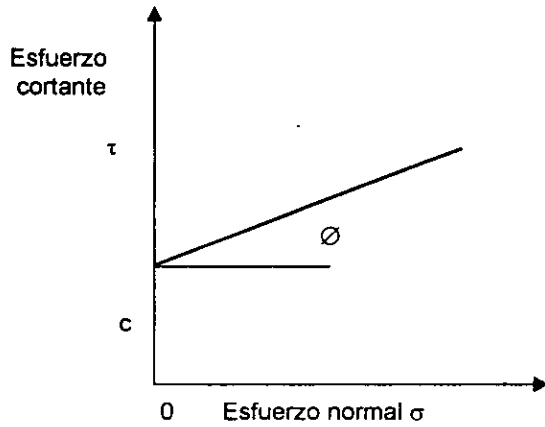
El concepto de bloque de deslizamiento sobre una superficie inclinada es aplicable a rocas duras que contienen estructuras de estratificación y fracturamiento. La figura 6.8.a representa una caliza fracturada con echado de aproximadamente 20° . La masa permanece estable incrementando los ángulos de echado (θ) hasta alcanzar (ϕ) , el ángulo de fricción, en donde se producirá un deslizamiento debido a su propio peso (figura 6.8.b). El coeficiente de fricción (μ) depende de la naturaleza de la superficie que se encuentra bajo la capa. Un estrato esta separado de otro por una capa fina de algún otro material de roca, de otra manera sería indistinguible de la roca que se encuentra abajo y formaría en conjunto una sola capa o algo similar. Estas capas delgadas que separan una capa claramente visible de otra se llaman juntas y consisten de agua, aire y sólidos, que pueden ser arcillas o algún otro material mineral sin consolidar, depositados durante cortos periodos en condiciones de sedimentación distintas a las que dieron lugar a la mayor parte de la roca.



(b)



(c)



Fuerzas que actúan sobre un bloque inclinado de peso W y área A de la base.

$$\text{Esfuerzo normal a través de la base} = \sigma = \frac{W \cos \theta}{A}$$

La fuerza $W \sin \theta$ hace que se deslice el bloque. A esta fuerza se opone la fuerza $R =$

$$\text{La resistencia al cortante de la superficie de contacto } XY = c + \frac{W \cos \theta}{A} \tan \theta$$

$$\tau A = cA + W \cos \theta \tan \theta$$

El bloque esta en condiciones de equilibrio limitado cuando $W \sin \theta = R$

$$W \sin \theta = cA + W \cos \theta \tan \theta$$

Si la cohesión $c = 0$, $W \sin \theta = W \cos \theta \tan \theta$

$$\tan \theta = \tan \theta$$

$$\theta = \theta$$

El efecto de la presión hidráulica en el plano de estratificación XY es reducir c y oponerse al esfuerzo normal σ .

Figura 6.8 Estabilidad de una roca dura y fracturada. a) Fuerzas que actúan sobre un bloque XY potencialmente inestable. b) Prueba de cortante. Los valores de τ , esfuerzo cortante/esfuerzo normal, causan el deslizamiento de un bloque sobre otro, al aumentar el esfuerzo normal σ . c) Gráfica de los resultados obtenidos en b). (Ver referencia 4)

Las fracturas que cruzan la capa también pueden estar llenas con la mezcla sólido-agua-aire, la cual ejerce en algunas ocasiones una fuerza adhesiva a través del plano de fractura, pero en otras, el contenido de agua puede ser alto y podrían surgir fuerzas de repulsión. El bloque permanecerá estable mientras las fuerzas que impiden el deslizamiento sean mayores que la componente gravitacional ($W \sin \theta$), descompuesta a lo largo del plano de estratificación, pero si el agua entra a las fracturas y a los planos de estratificación, las fuerzas de fricción y cohesión decrecen y se deslizará el bloque. Teóricamente el bloque se considera como una pieza simple, pero en la práctica se puede romper a través de discontinuidades que se intersecan, lo que hace que sea difícil el análisis teórico de las condiciones para lograr un equilibrio limitado. En la aplicación práctica de la teoría a las condiciones actuales de la roca si la excavación propuesta se realizara en una masa compuesta por distintas variedades de roca como arcilla, caliza, arenisca, arena parcialmente endurecida y en proceso de convertirse a arenisca dura, resulta con frecuencia que se debe usar un factor de seguridad muy alto y, en ocasiones, la pendiente aconsejable es menor que la pendiente natural del terreno de la zona. El ingeniero geólogo o el ingeniero geotécnico tienen la responsabilidad en esas circunstancias; en este caso, el factor de seguridad especificado puede conducir a un costo innecesario.

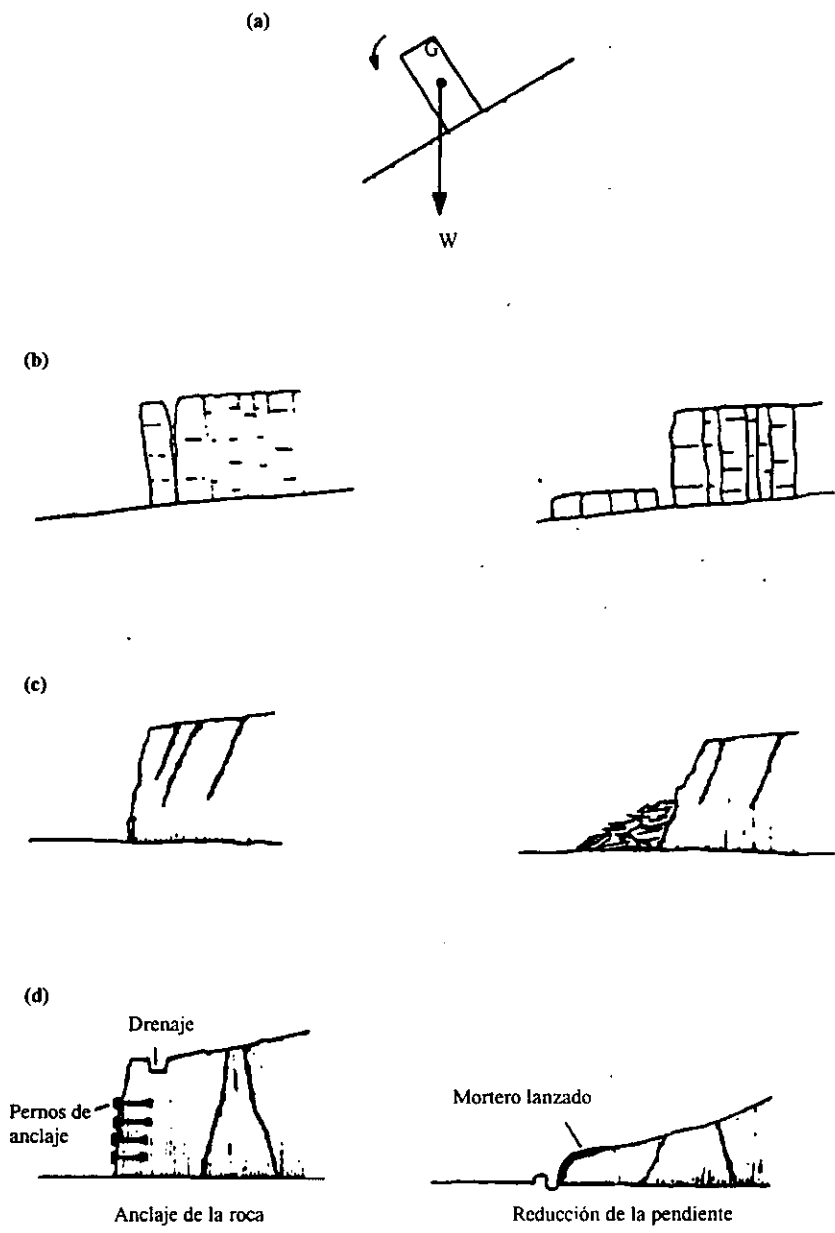


FIG. 6.9 Inestabilidad de la estructura de rocas verticales: a) bloque a punto de caer; b) desplome por la acción de acuñaamiento; c) colapso del frente de roca después de una excavación; d) medidas para prevenir colapsos. (Ver Ref. 4)

El desplome es un tipo de colapso que puede ocurrir en rocas con estratificación o clivaje verticales. La figura 6.10.a muestra la condición para que se produzca la caída de un bloque, es decir, cuando la línea vertical que pasa por el centro de gravedad pasa a un lado de la base. Para que esto suceda en condiciones reales, la fuerza perturbadora lateral debe provenir de una cuña de suelo de la roca intemperizada, la cual se acumuló en el fondo de una discontinuidad vertical como si fuera un plano de estratificación (figura 6.10.b). Esta ejerce una fuerza lateral que aumenta su efectividad a medida que se incrementa la masa o cuña del suelo. El agua del suelo suministra la presión hasta que el bloque se desploma y el proceso se repite con la capa siguiente que ha perdido su apoyo lateral.

La roca con clivaje vertical también puede caer de esta manera, cuando la resistencia de la base no soporta el peso de la roca de arriba después que se ha realizado un corte. La figura 6.10.c ilustra el proceso de este tipo de colapsos. El agua que se filtra desde la superficie, entrando a los planos de clivaje por la cima, con el tiempo penetrará en toda la masa rocosa y lenta, pero gradualmente empujará las capas exteriores hacia afuera, reduciendo la resistencia total. El proceso es acumulativo hasta que ocurre el desplome. Como medida preventiva será preferible un drenaje eficaz para el agua superficial que escurre del lado de la pendiente, y la aplicación de inyecciones de selladores en el clivaje a cierta distancia hacia atrás del corte, en lugar de quitar una gran masa de roca para reducir el ángulo de la pendiente (figura 6.10.d). También se pueden utilizar pernos de anclaje.

La base que sirve para clasificar los deslizamientos es la forma en que se mueve el material rocoso. El deslizamiento de translación o en un plano es aquel en el que el movimiento de la masa rocosa se realiza a lo largo de una superficie esencialmente plana aun cuando puede presentar irregularidades por fracturamiento intenso, estratificación cruzada o clivaje. Inversamente, cuando el plano de desplome es una falla, esta puede estar cruzada por planos de estratificación. La dirección de los movimientos de masa se realiza a lo largo de una línea recta (movimiento de translación). Este es el típico deslizamiento en rocas duras. El movimiento rotacional es característica del material plástico de grano fino, como la arcilla. La superficie curva en movimiento es parte de una superficie esférica o posiblemente cilíndrica o, incluso elíptica; por lo tanto, visto en planta el deslizamiento es una línea curva o recta si la superficie de deslizamiento es cilíndrica, en este tipo de deslizamientos el movimiento de la masa tiene un centro de rotación (O). El análisis más simple de este deslizamiento circular se hace tomando momentos con respecto a la línea vertical que pasa por el centro de gravedad de la masa. El producto del peso de la masa del suelo (W) por la distancia a esa línea (d) es el momento de la fuerza gravitacional que tiende a provocar el deslizamiento. A esto se opone la resistencia al esfuerzo cortante del suelo que actúa a lo largo del arco (PQ'). La resistencia total del suelo es la resistencia al esfuerzo cortante multiplicada por la longitud del arco (PQ) y el radio (r). En el límite del equilibrio estos dos momentos son iguales.

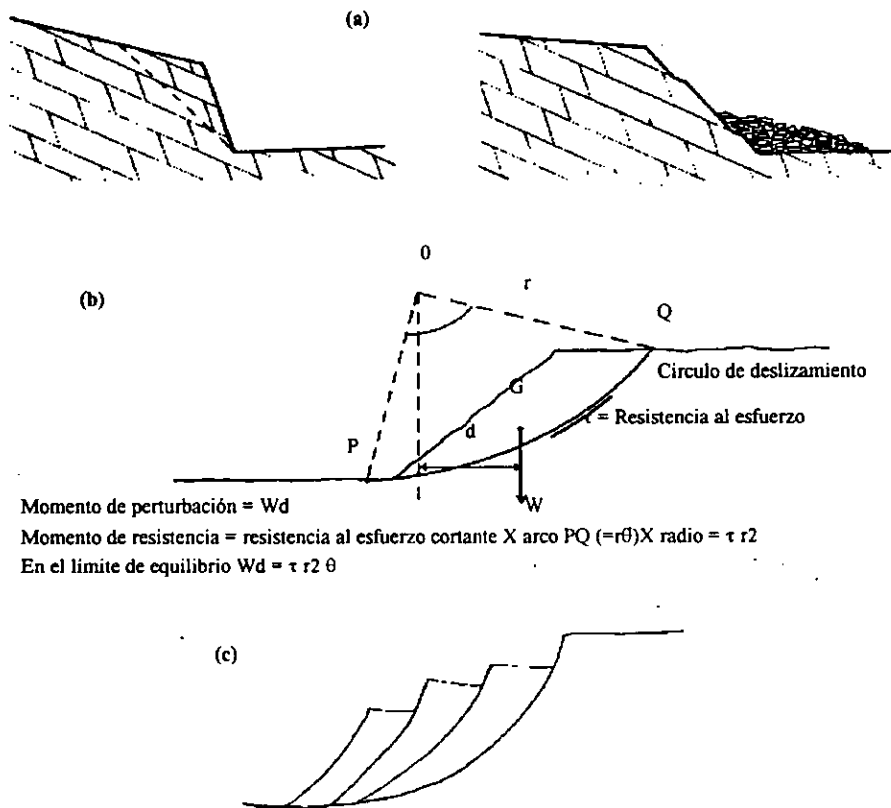


FIG. 6.10 Tipos de deslizamiento; a) deslizamiento con traslación a lo largo de planos; b) deslizamiento rotacional; c) deslizamiento de regresión múltiple. (Ver Referencia 4)

CAPITULO VII

CASO PRÁCTICO (CASA-HABITACIÓN EN ZONA DE MINAS)

7.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La empresa Ingeniería y Planeación, S. A., está proyectando una casa -habitación, por lo que requiere un estudio del subsuelo del predio que le permita contar con los datos geotécnicos básicos, necesarios para el proyecto estructural de la cimentación de la vivienda.

En este informe técnico se describen los trabajos exclusivamente de campo y gabinete, los de laboratorio se excluyeron debido al enfoque que se pretende dar a dicha tesis, pero que sin embargo, son de importancia; con ello se dan a conocer las características del subsuelo y los resultados y recomendaciones geotécnicas.

Este proyecto abarca grandes aspectos de estudio que se mencionan a continuación:

1. Reconocimiento geológico: interpretación fotográfica, encuestas, geología general, estratigrafía y detección de cavernas.
2. Prospección geoelectrica (exploración indirecta).
3. Exploración directa.
4. Trabajo de laboratorio.
5. Levantamiento geotécnico de cavernas.

7.2 DATOS GENERALES

El predio de interés se localiza en el No. 122 de la calle Paseo de las Lomas Altas, en la Colonia Lomas Altas de la Delegación Miguel Hidalgo, México D.F.; ver figura 7.1.

El lote es de forma irregular en planta, con ancho de 23 m y largo medio aproximado de 87 m, para una área total de 1995.00 m², ver figura 7.2. El frente del lote colinda con la calle paseo de Lomas Altas y el fondo esta limitado por una barranca. La característica topográfica mas relevante consiste en el desnivel de 30.5 m entre la banquetta y la parte mas baja del predio, ver figura 7.3.

La casa habitación tendrá un área de 8221.23 m² en 4 niveles. El anteproyecyo estructural indica que los entresijos consistirán de losas de concreto postensado, funcionan como elementos de apoyo para transmitir decargas al subsuelo comprendidas entre 3 ton/m² y 6 ton/m².

7.3 RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO

El reconocimiento geológico se orientó principalmente a la detección de antiguas minas subterráneas para la extracción de materiales de construcción. Para lo anterior se realizó un estudio de interpretación de fotografías aéreas, complementando con una verificación de campo y una encuesta levantada con los vecinos del lugar.

Se analizaron fotografías aéreas de las características siguientes:

Año	Escala
1936	1: 10,000
1945	1: 10,000
1963	1: 20,000
1977	1: 15,000

Las fotos de las fechas más antiguas se utilizaron para observar la zona de interés antes de su urbanización, y poder así reconocer rásgos de minado subterráneo. Las de fechas mas recientes se obtuvieron para correlacionar la posición de las posibles cavernas dentro de la mancha urbana. En estos casos se observaron pares estereoscópicos, salvo en el año 1936, donde la observación fue monoscópica.

7.3.1 GEOLOGÍA GENERAL

Con base en la información bibliográfica existente y lo observado en campo, se establece que el subsuelo de la zona ubicada forma parte de la *Formación Tarango*, la cual esta contituida por diversos materiales pirocláticos provenientes de la Sierra de las Cruces. Estos materiales sufrieron depositación directa o cierto redepósito por agua, conformando varios abanicos volcánicos situados al pie de la sierra citada. Entre estos depósitos se hallan lahares, arenas pumíticas y tobas cementadas.

En la actualidad los abanicos volcánicos han sido disectados por la erosión fluvial, por lo que morfológicamente constituyen una serie de lomas alargadas que apuntan hacia el Distrito Federal, en la dirección noreste.

7.3.2 ESTRATIGRAFÍA

Se reconocieron cuatro unidades distintas, que se diferenciaron no tanto por su estratigrafía, sino por su diferente cementación y por lo tanto distinta resistencia a la erosión, lo cual se expresa claramente en las fotografías aéreas. En la figura 7.4 y 7.4.A, se muestran los contactos fotogeológicos y una sección geológica a lo largo de la calle Paseo de las Lomas Altas. Las unidades observadas se describen a continuación:

Unidad A

Forma un escalón topográfico de aproximadamente 4 m de altura, que remata lo mas alto de las lomas, en forma discontinua. Corresponde a una toba arcillo-arenosa café claro, muy bién cementada, avces de tipo brechoide, bajo la cual se halla una toba arcillosa gris claro, que se agrieta fácilmente al ser expuesta a la intemperie.

Unidad B

Cuando la unidad A esta ausente, la unidad B constituye la parte superior de las lomas. Hacia las barrancas se expresa con taludes pronunciados subverticales. Su espesor es del orden de 10 m. Consiste en una toba arcillo-arenosa café amarillento y rojiza, brechoide en ocasiones, bien cementada, que pasa sin contacto deefinido a una brecha de lahar. Le subyace una toba arcillo-limosa café claro, bien cementada, bajo la cual se halla una toba arenosa pumítica café amarillento o blancuzco, medianamente cementada.

Unidad C

Forma hacia las barrancas una pendiente menos acentuada, debido a su menor resistencia a la erosión. Alcanza un espesor aproximado de 15 m. Está constituida por tobas areno-arcillosas, arcillo-arenosas o arenosas, de color café claro o café anaranjado, medianamente cementadas. En ocasiones el contenido de grava es alto, por lo que se vuelven brechoides.

Unidad D

Se presentan formando el fondo de las barrancas. Consiste en una brecha de lahar fuertemente cementada, que define taludes naturales subverticales. Su espesor se estima mayor a 20 m.

7.3.3 DETECCION DE CAVERNAS

Se detectaron cavernas en el frente del predio, a una profundidad de 4 a 6 m aproximadamente, que se extienden en todo el lindero colindante de Pase de Lomas Altas, y 23 m en el sentido del eje largo.

El análisis fotointerpretativo no fue determinante para la localización previa de cavernas, ya que estas fueron detectadas en el reconocimiento de campo y por referencia de los vecinos.

En síntesis dichas cavernas se ubican en la base de la unidad B, en estrato de la toba arenosa pumítica. En la fig. 7.5 se presenta un perfil detallado, paralelo al eje largo del predio, donde se describe la secuencia de suelos encontrada y se señala la posición de las cuevas.

Para la definición de la secuencia estratigráfica citada se efectuó un recorrido de campo y el levantamiento estratigráfico de 5 pozos a cielo abierto. Los pozos se localizaron convenientemente para obtener información geológica y muestras alteradas e inalteradas con fines de mecánica de suelos.

7.3.4 ENCUESTA

Se realizó una encuesta con los vecinos de la zona, principalmente aquellos cuyas viviendas fueron construídas a ambos lados del predio; los datos obtenidos se reseñan a continuación.

- Vecino al oriente del predio:

En su vivienda construyó un tiro para hacer un elevador. Hay aproximadamente 9 m de techo sobre la bóveda de los túneles. El material del techo es una toba brechoide bien cementada. Los túneles tienen aproximadamente la misma elevación que los del predio de interés. Posiblemente se comunican.

Ha construido varias casas en esta zona; en todas ellas se han detectado cuevas. Tiene conocimiento de una casa (a 5 m de la del predio, sobre la misma acera y dirección a Reforma) que comenzó a fallar ya construida (asentamientos y agrietamientos) y hubo que recimentarla desplantándose hasta el piso de las cavernas.

Ha recorrido los túneles y sabe que salen al campo de tiro Moctezuma.

- Vecino al poniente del predio:

Construyó su casa hace 18 años. Detectó las cavernas por que recorrió su predio; eran visibles dos entradas una por su terreno y otra por el terreno que está en estudio; ambas se comunican y parecen que constituyen un laberinto. Tiene el levantamiento de ellas en el caso de su predio. Dice que alcanzan un ancho de 3 a 4 m.; con altura de 2.20 a 2.40 m y que tienen la misma elevación. Del nivel de calle al techo de ellas puede haber aproximadamente 4 m.

Piensa que posiblemente las cavernas cruzan al otro lado (flanco sur de la loma), puesto que un amigo que tiene casa enfrente del predio, también las detectó. Cree que es posible que sacaran tepetate en bloques.

7.3.5 RESULTADOS

Puede asumirse que el minado subterráneo detectado en el predio ocurrió entre 1936 y 1945, aunque no se descarta la remota posibilidad de que haya sido antes de 1936.

Son bajas las posibilidades de hallar un nivel inferior de explotación al hallado en campo.

La estratigrafía encontrada (con excepción de la arena pumítica ya explotada) no es en principio favorable para la extracción de material.

En las fotografías aéreas, a la escala observada, no se detectan huellas, aunque sean leves, de un segundo nivel de explotación.

7.4 PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

Se realizaron 4 tendidos geofísicos por Resistividad Eléctrica con arreglo electródico Polo-Dipolo Múltiple Combinado, con equipo marca SCINTREX, compuesto por las unidades siguientes:

- Transmisor modelo IPC-7/2.5 Km.
- Receptor modelo IPR-8 de Resistividad y Polarización inducida.
- Fuente de poder de 2,500 watts.
- Carretes, electrodos y accesorios

Las 4 líneas o perfiles geoelectrónico se denominaron I, II, III, y IV, con una longitud de 20 m cada uno y una profundidad de exploración en el subsuelo de 10 a 16 m; su localización se muestra en la figura 7.3. El espaciamiento entre electrodos "a" fue de 4 m con "n" de 1, 2, 3 y 4 m.

La información geofísica que se obtuvo en campo de cada uno de los tendidos, fue procesada mediante el cálculo de las operaciones aritméticas respectivas, obteniéndose con ello el valor de la resistividad aparente (Tablas 7.1 a 7.4).

El valor de la resistividad aparente, fue trasladado a cada una de las figuras 7.7 a 7.14, para su interpretación, resultando de esta manera importantes anomalías manifestadas generalmente por áreas más o menos concéntricas con valores altos de resistividad, los cuales pueden corresponder a posibles zonas minadas o de fracturamiento.

7.4.1 INTERPRETACION DE LOS TENDIDOS GEOFISICOS

A continuación se describen brevemente las características geoelectricas de cada uno de los cuatro perfiles de tendidos geofisicos ejecutados.

Perfiles No. I, II y III

Estos perfiles abarcan una longitud de 20 m cada uno y rumbo aproximado hacia el norte (figuras 7.7 a 7.12).

Los tres perfiles presentan una clara anomalía, desde el inicio de los mismos en la estación 1 hasta la estación 3. Dichas anomalías se deben a la presencia de zonas minadas que se encuentran por debajo de estos puntos y que se inician a una profundidad muy somera, aproximadamente de 3 a 4 m, alcanzando profundidades hasta de 15 m, de lo que se puede inferir la posible existencia de dos niveles de explotación de estas minas.

También se observan otras anomalías de menor importancia en la estación 5 del perfil I (figuras 7.7 y 7.8) a una profundidad de 4 m, que se interpreta como una zona de fracturamiento exclusivamente.

Perfil No. IV

Este perfil abarca una longitud de 20 m con dirección este-oeste aproximadamente (figuras 7.13 y 7.14).

Se detectó otra anomalía en la estación 3, a una profundidad estimada de 4 m, que se correlaciona con una zona minada, la cual se prolonga hacia el inicio de los Perfiles I, II y III.

7.4.2 RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

En terminos generales, se aprecia que el terreno en cuestión esta sumamente minado y se considera como zona peligrosa a muy peligrosa, desde el frente del predio hasta aproximadamente 22 m medidos en el eje largo (figura 7.15).

Las zonas minadas están a una profundidad de 3 a 4 m y han provocado una debilidad que puede incidir en la estabilidad de cimentaciones importantes.

Se detectaron anomalías hasta profundidades de 15 m, de lo que se infiere la posibilidad de que existan dos niveles de explotación de estas minas.

De los 22 hasta los 33 m medidos en el sentido largo del predio, en general no se detectaron anomalías importantes, únicamente en la estación 5 del perfil I (figuras 7.7 y 7.8) se detectó una zona de fracturamiento a una profundidad de 4 m.

Se recomienda llevar a cabo un levantamiento topográfico a detalle de las zonas minadas que físicamente son observables.

Si la casa-habitación se requiere desplantar en la zona peligrosa (figura 7.15), se recomienda ejecutar previamente 2 exploraciones directas a una profundidad de 20 m, localizadas en los sitios que se señalan en la fig.7.15.

Las exploraciones tendrían como objetivo principal el determinar la presencia o no, de otros niveles de minas por debajo del ya conocido y además para conocer las características del subsuelo a esta profundidad.

De no encontrarse otros niveles de minas, solo se recomienda desplantar en la base de las excavaciones mineras, siguiendo las indicaciones del estudio de mecánica de suelos que se realice.

Se propone la ejecución de un sondeo a cielo abierto localizado a la altura de la estación 5 del perfil I (figura 7.7 y 7.8) con una profundidad mínima de 5.0 m, a fin de reconocer la zona de fracturamiento y descartar, en su caso, la existencia de cavidades.

7.5 EXPLORACIÓN DIRECTA

7.5.1 TRABAJOS DE CAMPO

Se realizaron un total de 5 pozos a cielo abierto, distribuidos como se muestra en la figura 7.3. Se ubicaron atendiendo a los requerimientos del Reconocimiento Geológico, de las recomendaciones emanadas del estudio geofísico y con la finalidad de conocer las propiedades índice y mecánicas del subsuelo que servirán de apoyo a la casa-habitación.

Se excavaron con pico y pala a una profundidad comprendida entre 3.5 y 5.2 m. De cada pozo se obtuvieron muestras alteradas por estrato y muestras cúbicas inalteradas. Se midió la resistencia de cada estrato con penetrómetro manual.

Se obtuvieron además muestras cúbicas inalteradas de los suelos que forman el techo de las cavernas y de los pilares.

Todas las muestras fueron debidamente identificadas y protegidas para ser enviadas al laboratorio de Mecánica de Suelos.

7.5.2 TRABAJOS DE LABORATORIO

Las muestras obtenidas de las paredes de los pozos a cielo abierto y de los lugares seleccionados en las cavernas, se sometieron a ensayos de laboratorio para clasificarlos con base al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y definir los parámetros de resistencia al corte. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- .- Contenido natural de agua
- .- Clasificación SUCS
- .- Granulometría por mallas
- .- Límite de Consistencia (Líquido y Plástico)
- .- Densidad de Sólidos
- .- Compresión axial no confinada

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla No.7.5 y en las figuras 7.16 a 7.21 se muestran las carátulas de los ensayos de compresión axial no confinada.

7.5.3 ESTRATIGRAFÍA Y PROPIEDADES

- Pozo a Cielo Abierto PCA-1

Alcanzó una profundidad de 3.5 m, no se detectó el nivel de agua freática. La estratigrafía encontrada en el pozo es la siguiente:

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN
0.00 - 1.00	Arena mal graduada, poco limosa, compacta cementada, con granos de naturaleza pumítica, color gris claro y café. Contiene 6% de partículas tamaño grava, 91% tamaño arena y 3% de finos con límite líquido de 57% e índice plástico de 16%. Con base al SUCS se clasifica como SP. Su contenido natural de agua es de 40% y la resistencia al corte de 30 ton/m ² . Constituye la base del material explotado.
3.00 - 3.50	Arena arcillosa, compacta, color café oscuro. Contiene 52% de partículas tamaño arena y 48% de finos con límite líquido de 42% e índice plástico de 18%. Con base al SUCS se clasifica como SC. El contenido natural de agua es de 20% y la resistencia al corte de 49 ton/m ² .
	Arcilla poco arenosa, café oscuro, de consistencia dura. Contiene 28% de partículas tamaño arena y 72% de finos con límite líquido de 57% e índice plástico de 28%, por lo que se clasifica como CH. El contenido natural de agua es de 44% y la resistencia al corte de 25 ton/m ² .

Con el penetrómetro manual no se obtuvo la resistencia de ninguna capa, puesto que se rebasó la capacidad de registro máximo del dispositivo.

- Pozo a cielo Abierto PCA-2

Alcanzó una profundidad de 4.3 m , no se detectó el nivel de agua freática.

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN
0.00 - 0.30	Capa vegetal, arena limo-arcillosa, café claro, muy suelta.
0.30 - 2.70	Relleno, arena limosa, muy suelta, con raíces. Contiene 11% de partículas tamaño grava, 80% de arena y 9% de finos con límite líquido de 56% e índice plástico de 8%. Con base al SUCS se clasifica como SM. El contenido natural de agua es de 30%. La resistencia al corte determinada con penetrómetro manual es de 0 kg/cm ² . El relleno fue formado con el material explotado de la mina.
2.70 - 3.20	Arcilla arenosa, café oscuro, muy plástica, con raíces, constituye la capa vegetal original, que fue cubierta con el relleno de arena limosa. Contiene 40% de partículas tamaño arena y 60% de finos con límite líquido de 37% e índice plástico de 20%. Con base al SUCS se clasifica como CL. El contenido natural de agua es de 15%; la resistencia al corte medida con penetrómetro manual es de 55 ton/m ² y con prueba de compresión de 1.8 ton/m ²
3.20 - 4.30	Arcilla poco arenosa, café rojizo, de consistencia dura. El contenido natural de agua es de 25%. Rebasa la resistencia máxima de registro del penetrómetro.

- Pozo a Cielo Abierto PCA-3

Este pozo alcanzó una profundidad de 5.20 m, no se detectó el nivel de agua freática.

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN
0.00 - 2.40	Relleno, arena limosa, café, muy suelta. Contiene 6% de partículas tamaño grava, 81% de arena y 13% de finos limosos. Se formó con material producto de la explotación de minas. El contenido natural de agua es de 10%.
2.40 - 3.40	Arcilla arenosa, café oscuro, muy plástica, con raíces, constituye la capa vegetal original, que fue cubierta con el relleno de arenalimosa. Contiene 45% de partículas tamaño arena y 55% de finos con límite líquido de 42% e índice plástico de 19%. Con base al SUCS se clasifica como CL. El contenido natural de agua es de 16%. La resistencia al corte medida con penetrómetro manual es de 60 ton/m ² .
3.40 - 5.00	Arena arcillosa, compacta, color café claro. Su resistencia rebasa la capacidad máxima de registro del penetrómetro manual.
5.00 - 5.20	Arcilla arenosa, café rojizo de consistencia dura. Contiene 38% de partículas tamaño arena y 62% de finos con límite líquido de 46% e índice plástico de 17%. Se clasifica con base al SUCS como CL. Su resistencia rebasa la capacidad máxima de registro del penetrómetro manual.

- Pozo a Cielo Abierto PCA-4

Se alcanzó una profundidad de 5.10 m, no se detectó el nivel de agua freática.

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN
0.00 - 1.50	Relleno, arena limosa, café claro, muy suelta, formado con el material de explotación de la mina.
1.50 - 2.10	Terreno natural, arcilla arenosa, café oscuro, muy plástica. El penetrómetro manual registra una resistencia de 35 ton/m ² .
2.10 - 2.80	Arena arcillosa, café amarillento, contiene 63% de partículas tamaño arena, 37% de finos con límite líquido de 32% e índice plástico de 10%. Se clasifica en base al SUCS como SC. Su resistencia rebasa la capacidad máxima de registro del penetrómetro. Su contenido natural de agua es de 15%.
2.80 - 3.50	Arena con grava, arcillosa, gris oscuro, compacta. Contiene 26% de partículas tamaño grava 61% de arena y 13% de finos con límite líquido de 40% e índice plástico de 24%. Con base al SUCS se clasifica como SC. El contenido natural de agua es de 16% y su resistencia rebasa la capacidad máxima de registro del penetrómetro manual.
3.50 - 5.10	Arena con grava, limosa, de color gris, compacta. Contiene 19% de partículas tamaño grava, 65% de arena y 16% de finos con límite líquido de 29% e índice plástico de 3%. Con base al SUCS se clasifica como SM. El contenido natural de agua es de 12% y la resistencia rebasa la capacidad máxima de registro del penetrómetro manual.

- Pozo a Cielo Abierto PCA-5

Se alcanzó una profundidad de 4.00 m, no se detectó el nivel de agua freática

Profundidad (m)	Descripción
0.00 - 0.80	Relleno, arena limosa, café claro, muy suelta, formado con material producto de la explotación de la mina.
0.80 - 1.50	Terreno natural, arcilla café oscuro, de consistencia dura. El penetrómetro manual registra una resistencia de 50 ton/m ² .
1.50 - 3.00	Arcilla arenosa, café oscuro, de consistencia dura. Contiene 40% de partículas tamaño arena y 60% de finos con límite líquido de 51% e índice plástico de 35%, por lo que se clasifica como CH. El contenido natural de agua es de 27%. Su resistencia rebasa la capacidad máxima de registro del penetrómetro.
3.00 - 4.00	Arena con grava, limosa, gris claro, compacta. Contiene 21% de grava, 65% de arena y 14% de finos, con límite líquido de 38% e índice plástico de 4%, por lo que se clasifica según el SUCS como SM. Su contenido natural de agua es de 56%. Su resistencia rebasa la capacidad máxima de medición del penetrómetro manual.

Se efectuó el muestreo del material que constituye el techo de las coronas existentes y de los pilares. Los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados en estos materiales se describen a continuación:

Material de Pilares

Esta formado de arena con grava y pocos finos, de color café claro, compacta. Contiene 24% de partículas tamaño grava, 68% de arena y 8% de finos con límite líquido de 55% e índice plástico de 9%, por lo que se clasifica con base al SUCS como SP-SM. Su contenido natural de agua es de 56% y su resistencia al corte medida en prueba de compresión axial no confinada, resultó ser de 7 ton/m².

Material de Techo

Esta formado por una arena limo arcillosa, color café y gris, compacta. Contiene 62% de partículas de tamaño arena y 38% de finos, con límite líquido de 44% e índice plástico de

16%, por lo que se clasifica con base al SUCS como SM. El contenido natural de agua es de 25% y su resistencia al corte medida en prueba de compresión axial no confinada es de 41 ton/m².

En las figuras 7.22 a 7.26 se muestran los perfiles estratigráficos de los pozos a cielo abierto CPA-1 a PCA-5.

7.7.1 RESULTADOS

- Los pozos a cielo abierto que se realizaron se ubicaron para obtener el perfil estratigráfico que se muestra en la figura 7.8 e investigar en relación a la zona indicada como estación 5 del perfil I de exploración geofísica.

Se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas para conocer las características índice y mecánicas del subsuelo y del techo y pilares de la zona minada.

- Los resultados de los trabajos realizados indican que el subsuelo esta constituido por arenas arcillosas, arenas limpias (Material explotado) o poco limosas y arcillas arenosas.

- Los materiales aproximados a la cota aproximada de -15 m (tomando como referencia el nivel de banquetta) se tratan de arenas con grava, arcillosas y limosas clasificadas como SC y SM, que en general no son susceptibles de explotación como material de construcción.

- De existir cavidades a la cota -15 m, en la zona donde indica el estudio geofísico en que se presentan las anomalías, se tendrían techos del orden de 9.0 m.

- En la zona de la estación 5 del perfil I, se investigó con los pozos a cielo abierto PCA-3 y PCA-4; no se encontraron en el sitio anomalías o cavidades.

- El subsuelo superficial de relleno, formado por arena pumítica, es de compacidad suelta a muy suelta; los suelos que los subyacen son compactos o de consistencia blanda a dura.

7.6 LEVANTAMIENTO GEOTECNICO DE CAVERNAS

Se efectuó la inspección geotécnica de las cavernas localizadas en la zona de acceso al predio, cuya distribución en planta y perfil se muestran en la figura 7.3.

Las galerías tienen un ancho medio del orden de 3 m y altura de 1.8 m, sostenidas por pilares del mismo material de explotación. Desde el acceso hasta aproximadamente 13 m medidos sobre el eje largo del predio, el techo tiene un espesor medio de 8.0 m; de los 13 m a los 23 m el techo disminuye en espesor y en algunos sitios consiste en una ligera costra de escasos 0.30 m.

Con base en el levantamiento topográfico se puede decir que existen cinco pilares, con sección en planta de forma irregular y área variable entre 25 m² y 45 m².

Los pilares se observan inestables, se han desprendido bloques de dimensiones variables entre 0.10 m a 1.00 m de lado y también se observan desconchamientos del recubrimiento de cal. En el costado poniente (colindancia con el predio vecino) se han construido muros de mampostería que cubren las paredes y otros que reducen el claro libre de las cavernas.

La resistencia a la compresión de la arena pumítica que forma los pilares es de 14 ton/m², de lo que se puede deducir que en conjunto los cinco pilares tienen actualmente una capacidad de soporte del orden de 1,800 ton.

El material de techo consiste en una arena limosa compacta, de la cual se han desprendido bloques de dimensiones variables entre 0.25 m a 1.50 m. La resistencia a la compresión simple de este material es de 83 ton/m² y su peso volumétrico es de 1.70 ton/m³.

Los pilares soportan a al fecha un volumen aproximado de 1,600 m³ de material de techo, lo que implica un peso total de 2,700 ton aproximadamente.

Los efectos de arqueo principalmente, y la presencia de muros de mampostería que reducen el claro libre de las cavidades, parecen ser los principales factores que han evitado el colapso de las cavidades.

De la inspección realizada se concluye que la zona minada no es apta para soportar cargas adicionales y que se deberán tomar medidas para reforzar las bóvedas y proteger a los pilares contra el intemperismo.

Para reforzar las cavidades se recomienda la construcción de muros de mampostería a lo largo de cada eje para reducir el claro libre a la mitad. El cimiento de los muros consistirá en zapatas aisladas desplantadas a una profundidad mínima de 0.10 m medida a partir del nivel de piso actual, considerando una capacidad de carga admisible de 15 ton/m².

Los cimientos deberán transmitir al subsuelo un total de 1000 ton, más la sobrecarga que resulte por el peso propio del muro. El proyecto arquitectónico indica que la zona del frente del predio y hasta 13 m medidos en el eje largo, estará destinada a estacionamiento; esta sobrecarga y cualquier otra que resulte, deberá ser incluida en la carga que soportará el muro.

En la parte superior del muro se deberá garantizar un buen contacto con la bóveda, lo que se podrá lograr con un mortero que incluya aditivo expansor.

Como parte de esta solución se requerirá recubrir las paredes y clave para evitar la acción del intemperismo, lo cual se podrá lograr con concreto lanzado de 3 cm de espesor.

Se deberá proyectar en el área de estacionamiento un drenaje adecuado, para evitar la infiltración de agua desde este sitio a la clave y pilares de las cavernas.

El proyecto arquitectónico indica que la casa-habitación cubrirá parte de la zona minada, iniciándose a partir de los 13 m y hasta los 23 m medidos sobre el eje largo del predio. La cimentación en esta zona se discutirá en el siguiente punto.

7.7 INGENIERÍA DE CIMENTACIONES

El área de construcción ubicada en zona de cavernas, necesariamente deberá transmitir las cargas al subsuelo por debajo del nivel de piso de las oquedades.

Para cimentar esta zona se deberá optar por zapatas corridas desplantadas a una profundidad de 2.0 m medidos a partir del piso de las oquedades, considerando una capacidad de carga admisible de 15 ton/m^2 .

Fuera de la zona minada, el anteproyecto estructural indica que los entrepisos consistirán de losas de concreto postensado, que servirán al mismo tiempo como elementos transmisores de las descargas al subsuelo. En toda esta zona se requerirán de rellenos sobre los cuales se apoyarán las losas.

La losa postensada se considera adecuada para cimentar la vivienda, siempre y cuando se adopten los siguientes lineamientos constructivos:

- Se deberá eliminar la capa vegetal superficial, en un espesor medio de 0.50 m.
- Por debajo de la capa vegetal se localiza un relleno de arena pumítica con espesor medio de 2.0 m. La arena, producto de la rezaga de explotación de la mina, se encuentra en estado muy suelto. Esta capa deberá ser retirada y almacenada para su posterior utilización.
- Subyaciendo al relleno arenoso se localiza el terreno natural original. Esta capa de espesor medio de 0.50 m es una arcilla poco arenosa, muy plástica, contaminada con materia orgánica, que constituye una superficie potencial de deslizamiento. Se deberá retirar en todo su espesor y solo se podrá utilizar en área de jardines.
- Después de retirar la capa arcillosa, contaminada con materia orgánica, se efectuarán cortes para formar escalones de liga con ancho mínimo de huella de 2.0 m; se escarificará el piso descubierto en un espesor de 15 cm y se compactará con rodillo liso vibratorio al 95% del P.V.S.M. obtenido en laboratorio con la prueba Proctor Estándar. El material areno-arcilloso producto de estos cortes podrá ser utilizado para el relleno posterior.
- La arena pumítica y la arena arcillosa almacenadas, se utilizará para formar los rellenos, colocándolas en capas sensiblemente horizontales, con espesor máximo suelto de 20 cm. Para su compactación se deberá utilizar un equipo de rodillo liso vibratorio, compactando cada capa al 95% de su P.V.S.M. obtenido en laboratorio con la Prueba Próctor Estándar y/o Próctor Estándar.
- De requerirse material importado, este deberá ser una arena limosa (tepetate), la cual se compactará por capas de 20 cm de espesor máximo suelto, hasta alcanzar el 95% de su P.V.S.M. obtenido en laboratorio con la prueba Próctor Estándar.
- Alcanzando el nivel de proyecto, se contruirá una plantilla de concreto pobre de 5 cm de espesor. Las losas se apoyarán sobre la plantilla de concreto.
- La capacidad de carga admisible en éstas condiciones será de 15 ton/m^2 .
- Los asentamientos que se generarán serán de tipo elástico y de magnitud prácticamente despreciable.

El proyecto arquitectónico contempla la construcción de dos muros de contención. El muro que se ubica en el eje 6 se utilizará para soportar los empujes activos del terreno natural y el que se ubica en la parte posterior de la construcción, deberá diseñarse para

contención de rellenos compactados.

En el primer caso se deberá seleccionar el empuje activo de los mostrados a continuación:

H (m)	EA (ton/m)
3	2
4	6
5	11
6	19
7	28
8	38

En el caso de muros de contención para los rellenos compactados, el empuje activo se podrá calcular con base en la siguiente expresión :

$$EA = 0.23 H^2 + 0.33 qH$$

donde:

EA = Empuje activo en ton/m

H = Altura de muro en m

q = Sobrecarga en ton/m²

VALORES DE RESISTIVIDAD APARENTE

PERFIL I

TABLA 7.1

H-nl I Up δ			H-nl I Up δ			H-nl I Up δ			H-nl I Up δ		
26-6			26-6			26-6			26-6		
22-5			22-5			22-5			22-5		
18-4			18-4			18-4			18-4		
14-3	0.56	30 x 2.76	14-3	0.52	30 x 3.10	14-3	0.27	30 x 2.80	14-3	0.14	3 x 3.08
10-2	0.51	100 x 2.10	10-2	0.27	30 x 3.00	10-2	0.14	30 x 1.95	10-2	0.50	30 x 2.00
6-1	0.26	300 x 2.56	6-1	0.13	100 x 1.03	6-1	0.48	300 x 2.00	6-1	0.74	100 x 1.85
6-1	1.10	300 x 3.17	6-1	0.68	100 x 1.57	6-1	0.66	300 x 1.40	6-1	0.58	300 x 1.12
10-2	0.58	30 x 2.55	10-2	0.55	30 x 1.95	10-2	0.57	100 x 1.40	10-2	0.98	100 x 2.06
14-3	2.20	30 x 1.82	14-3	0.50	30 x 1.45	14-3	0.90	100 x 1.50	14-3	0.98	30 x 2.90
18-4	0.53	30 x 1.20	18-4	0.90	30 x 1.73	18-4	0.98	30 x 2.83	18-4	0.78	30 x 1.67
22-5			22-5			22-5			22-5		
26-5			26-6			26-6			26-6		

DIRECTO

INVERTIDO

VALORES DE RESISTIVIDAD APARENTE

PERFIL III

H-nl I Up δ		H-nl I Up δ		H-nl I Up δ		H-nl I Up δ	
26-6		26-6		26-6		26-6	
22-5		22-5		22-5		22-5	
18-4		18-4		18-4		18-4	
14-3	1.40 100 x 1.77 38.1	14-3	1.20 100 x 1.33 55.7	14-3	1.03 30 x 1.83 26.8	14-3	0.52 10 x 2.27 21.9
10-2	1.18 300 x 1.23 15.7	14-3	1.00 100 x 2.03 60.9	14-3	0.60 30 x 1.77 26.7	14-3	0.84 30 x 1.90 20.5
6-1	1.23 1K x 1.03 42.5	10-2	1.10 300 x 1.40 57.5	14-3	0.60 30 x 1.77 26.7	14-3	0.84 30 x 1.90 20.5
6-1	0.95 300 x 3.08 54.7	6-1	1.00 300 x 2.40 60.4	10-2	0.83 100 x 1.47 26.7	10-2	0.82 100 x 1.15 24.1
10-2	0.36 30 x 2.05 35.7	6-1	1.00 300 x 1.78 64.0	6-1	0.95 300 x 3.72 59.1	6-1	0.42 100 x 2.93 35.1
14-3	0.43 30 x 1.17 34.6	6-1	1.00 300 x 2.15 27.0	6-1	0.40 100 x 1.13 13.2	6-1	0.37 100 x 2.63 35.6
18-4	0.54 30 x 1.10 30.1	10-2	0.56 30 x 2.33 32.9	10-2	0.64 30 x 3.60 18.8	10-2	0.58 100 x 1.35 35.1
22-5		14-3	0.64 30 x 2.33 32.9	14-3	0.57 30 x 1.54 25.4	14-3	0.48 30 x 1.56 29.4
26-6		18-4	0.44 30 x 1.30 44.5	18-4	0.57 30 x 1.65 43.6	16-4	0.60 30 x 1.30 30.1
		22-5		22-5		22-5	
		26-6		26-6		26-6	

DIRECTO

INVERTIDO

VALORES DE RESISTIVIDAD APARENTE

TABLA 7.4 PERFIL IV

DIRECTO			INVERTIDO		
H-nl	I	Up	H-nl	I	Up
26-6			26-6		
22-5			22-5		
18-4			18-4		
14-3	0.98	30 x 2.70	14-3	1.33	30 x 2.70
10-2	1.20	100 x 1.40	10-2	1.00	100 x 1.40
6-1	0.90	300 x 1.15	6-1	0.83	300 x 1.15
2-1	0.52	300 x 1.25	2-1	0.50	300 x 1.25
10-2	0.98	100 x 2.54	10-2	0.95	100 x 2.54
14-3	1.70	100 x 2.38	14-3	1.58	100 x 2.38
18-4	1.20	100 x 1.20	18-4	0.70	30 x 1.65
22-5			22-5		
26-6			26-6		
26-6			26-6		
22-5			22-5		
18-4			18-4		
14-3	1.20	30 x 2.02	14-3	1.00	100 x 1.10
10-2	1.65	300 x 1.17	10-2	1.65	300 x 1.17
6-1	0.83	300 x 1.83	6-1	0.83	300 x 1.83
2-1	0.50	300 x 2.23	2-1	0.50	300 x 2.23
10-2	0.98	100 x 1.98	10-2	0.98	100 x 1.98
14-3	1.70	100 x 2.38	14-3	1.53	100 x 2.38
18-4	1.20	100 x 1.20	18-4	0.72	30 x 2.35
22-5			22-5		
26-6			26-6		

INVERTIDO

TABLA 7.5

1 de 4

RESUMEN DE RESULTADOS DE LABORATORIO

PROYECTO : CASA - HABITACION

UBICACION : AV. PASEO LOMAS ALTAS N° 226

PROPIEDAD	M - 1	M - 2	M - 3	M - 4	M - 5
CLASIFICACION SUCS					
PORCENTAJE DE GRAVA	6.33	0.00	0.00	11.41	0.00
PORCENTAJE DE ARENA	90.81	51.44	27.97	79.73	40.23
PORCENTAJE DE FINOS	2.86	48.56	72.03	8.86	59.77
COEFICIENTE UNIFORMIDAD					
COEFICIENTE DE CURVATURA					
COMPACTAD RELATIVA					
LIMITE LIQUIDO (%)	56.80	42.40	57.40	55.60	37.00
INDICE PLASTICO (%)	15.60	17.80	28.01	8.24	20.37
LIMITE DE CONTRACCION (%)					
CONTRACCION LINEAL (%)					
INDICE DE TENACIDAD					
INDICE DE LIQUIDEZ					
HUMEDAD NATURAL (%)	40.440	20.290	43.880	28.990	14.890
DENSIDAD DE SOLIDOS	2.696	2.567	2.665		2.669
PESO VOLUMETRICO NATURAL (ton/m ³)	1.297	1.638	1.532		1.333
PESO VOLUMETRICO SECO (ton/m ³)	0.930	1.308	1.087		1.146
GRADO DE SATURACION (%)	55.890	67.570	75.210		32.950
RELACION DE VACIOS	1.900	0.960	1.450		1.330
POROSIDAD (%)	65.470	49.070	59.210		57.100

NOTAS:

TABLA 7.5

2 de 4

RESUMEN DE RESULTADOS DE LABORATORIO

PROYECTO : CASA - HABITACION

UBICACION : AV. PASEO LOMAS ALTAS N° 226

PROPIEDAD	M - 6	M - 7	M - 8	M - 9	M - 10
CLASIFICACION SUCS					
PORCENTAJE DE GRAVA	0.00	6.01	0.00	0.00	0.00
PORCENTAJE DE ARENA	21.19	81.02	45.24	37.53	63.31
PORCENTAJE DE FINOS	78.81	12.97	54.76	62.47	36.69
COEFICIENTE UNIFORMIDAD					
COEFICIENTE DE CURVATURA					
COMPACTAD RELATIVA					
LIMITE LIQUIDO (%)	59.40		42.00	46.20	32.40
INDICE PLASTICO (%)	32.60		18.52	17.06	9.67
LIMITE DE CONTRACCION (%)					
CONTRACCION LINEAL (%)					
INDICE DE TENACIDAD					
INDICE DE LIQUIDEZ					
HUMEDAD NATURAL (%)	24.90	9.42	15.83	27.63	14.75
DENSIDAD DE SOLIDOS					
PESO VOLUMETRICO NATURAL (ton./m ³)		1.028			
PESO VOLUMETRICO SECO (ton./m ³)					
GRADO DE SATURACION (%)					
RELACION DE VACIOS					
POROSIDAD (%)					

NOTAS:

TABLA 7.5

3 de 4

RESUMEN DE RESULTADOS DE LABORATORIO

PROYECTO : CASA - HABITACION

UBICACION : AV. PASEO LOMAS ALTAS N° 226

PROPIEDAD	UNIDAD	M - 11	M - 12	M - 13	M - 14	M - 15
CLASIFICACION SUCS						
PORCENTAJE DE GRAYA		25.77	18.99		21.23	24.46
PORCENTAJE DE ARENA		61.41	65.33		65.39	67.61
PORCENTAJE DE FINOS		12.82	15.68		13.38	7.93
COEFICIENTE UNIFORMIDAD						
COEFICIENTE DE CURVATURA						
COMPACTACION RELATIVA						
LIMITE LIQUIDO (%)		39.50	28.50	50.80	37.80	55.20
INDICE PLASTICO (%)		23.97	3.00	35.11	3.91	9.96
LIMITE DE CONTRACCION (%)						
CONTRACCION LINEAL (%)						
INDICE DE TENACIDAD						
INDICE DE LIQUIDEZ						
HUMEDAD NATURAL (%)		15.55	11.26	26.80	14.24	55.60
DENSIDAD DE SCLIDOS						2.65
PESO VOLUMETRICO NATURAL (ton/m ³)						
PESO VOLUMETRICO SECO (ton/m ³)						
GRADO DE SATURACION (%)						
RELACION DE VACIOS						
POROSIDAD (%)						

NOTAS:

TABLA 7.5

4 de 4

RESUMEN DE RESULTADOS DE LABORATORIO

PROYECTO : CASA - HABITACION

UBICACION : AV. PASEO LOMAS ALTAS N° 226

PROPIEDAD	UNIDAD	M - 16
CLASIFICACION SUCS		
PORCENTAJE DE GRAVA		0.000
PORCENTAJE DE ARENA		62.250
PORCENTAJE DE FINOS		37.750
COEFICIENTE UNIFORMIDAD		
COEFICIENTE DE CURVATURA		
COMPACTAD RELATIVA		
LIMITE LIQUIDO (%)		44.000
INDICE PLASTICO (%)		16.030
LIMITE DE CONTRACCION (%)		
CONTRACCION LINEAL (%)		
INDICE DE TENACIDAD		
INDICE DE LIQUIDEZ		
HUMEDAD NATURAL (%)		24.910
DENSIDAD DE SOLIDOS		2.719
PESO VOLUMETRICO NATURAL (ton/m ³)		1.689
PESO VOLUMETRICO SECO (ton/m ³)		1.384
GRADO DE SATURACION (%)		62.370
RELACION DE VACIOS		0.960
POROSIDAD (%)		49.090

NOTAS:

CROQUIS DE LOCALIZACION GENERAL

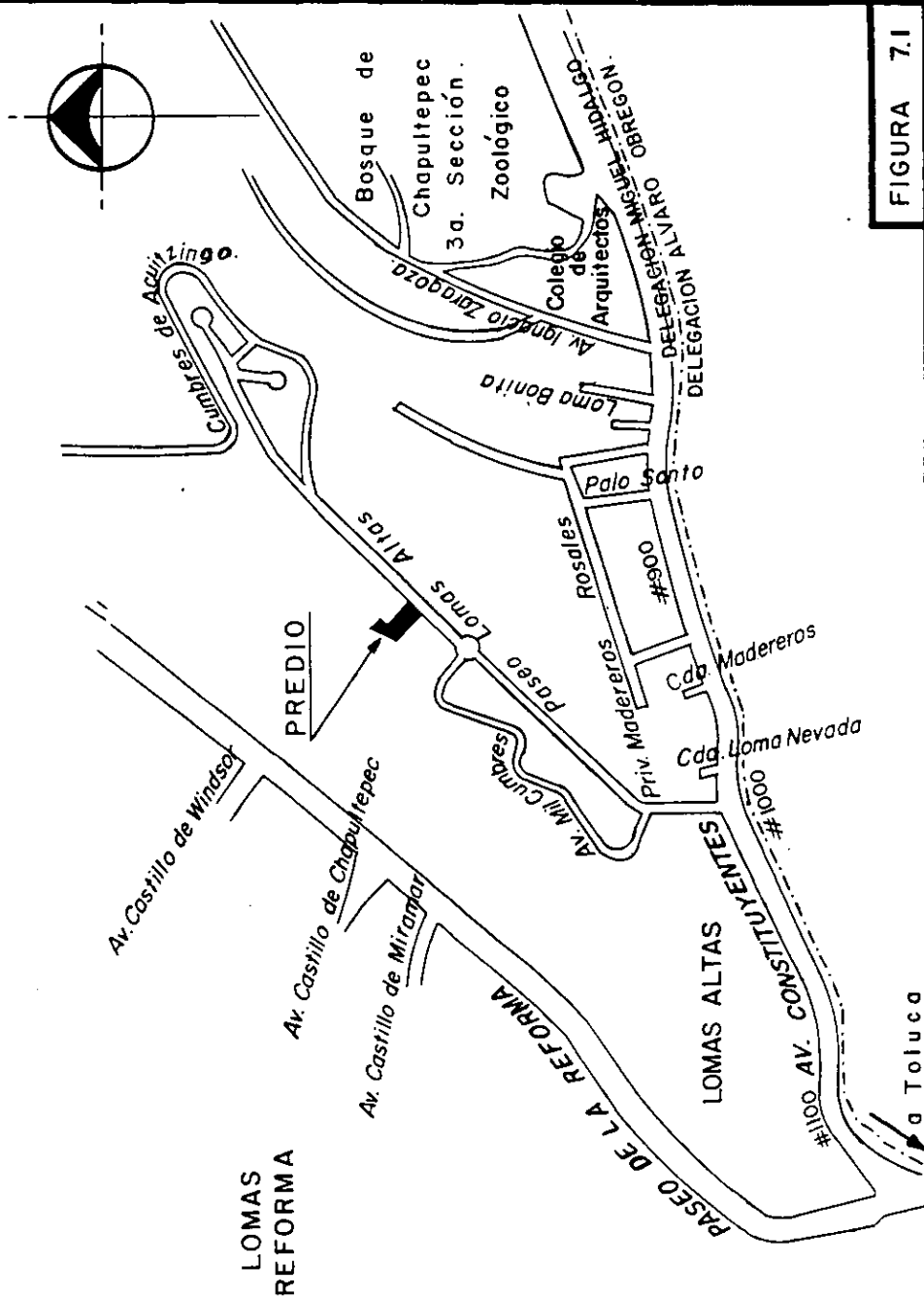


FIGURA 7.1

CROQUIS DE LOCALIZACION PARTICULAR

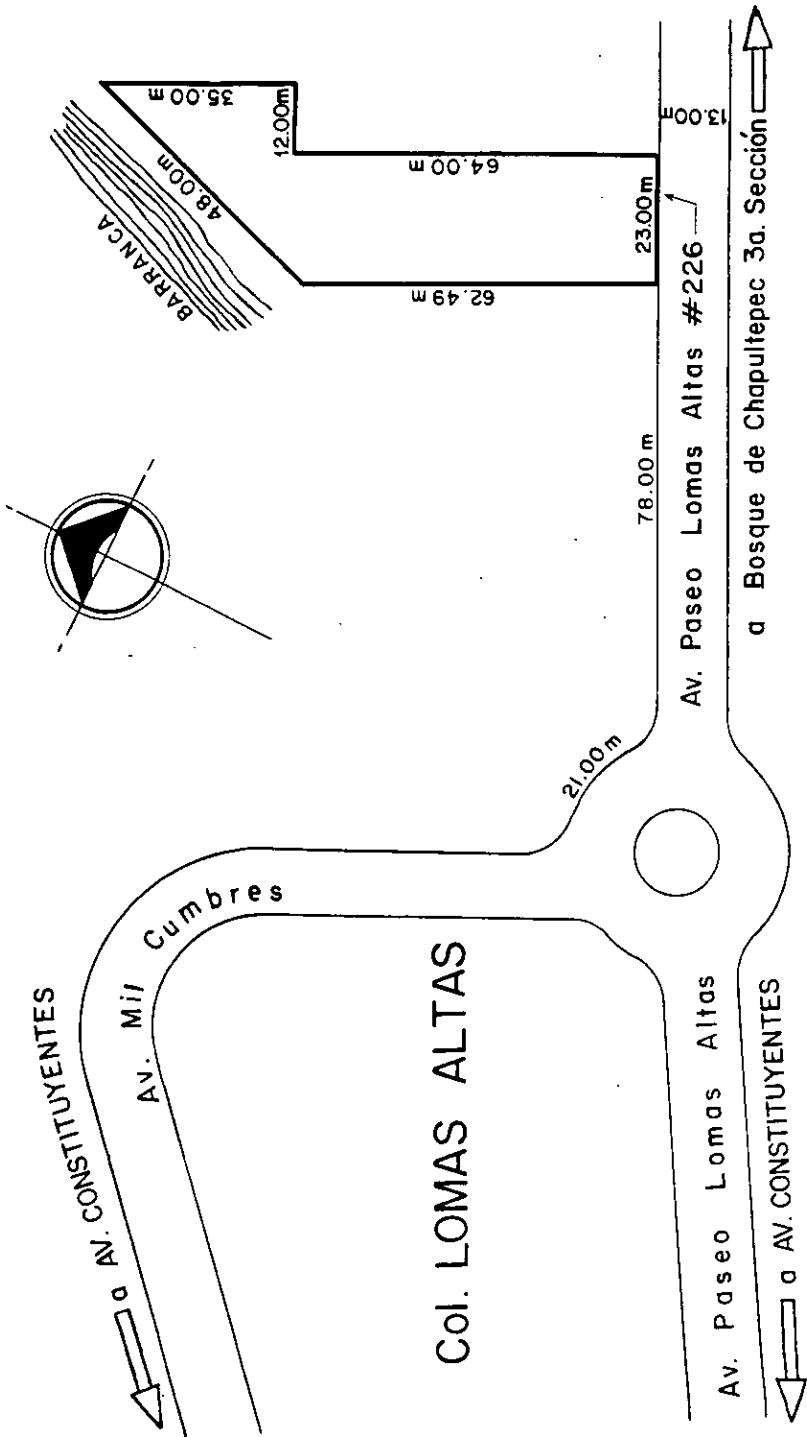
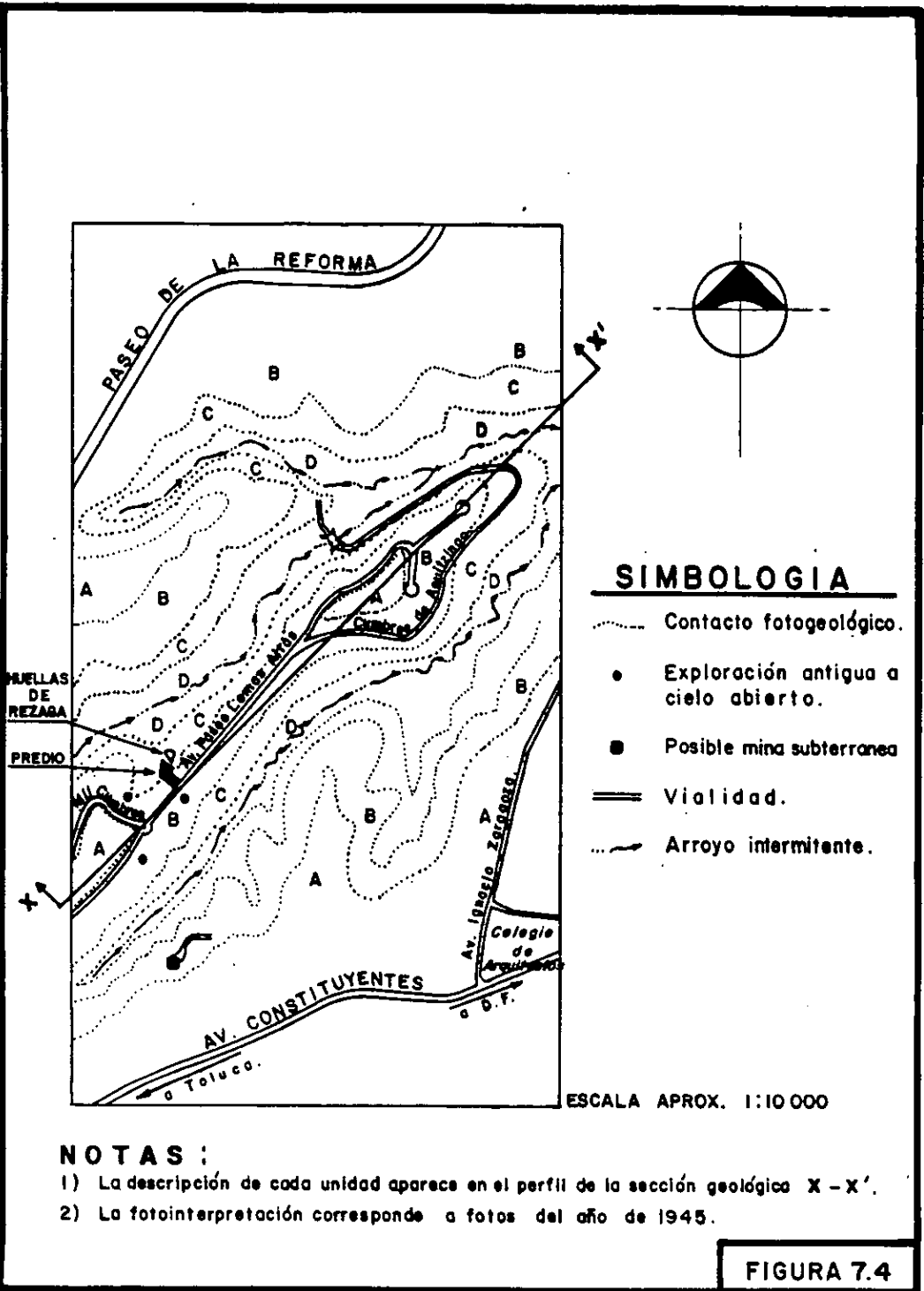


FIGURA 7.2



SIMBOLOGIA

- Contacto fotogeológico.
- Exploración antigua a cielo abierto.
- Posible mina subterránea
- == Vialidad.
- > Arroyo intermitente.

ESCALA APROX. 1:10 000

NOTAS :

- 1) La descripción de cada unidad aparece en el perfil de la sección geológica X - X'.
- 2) La fotointerpretación corresponde a fotos del año de 1945.

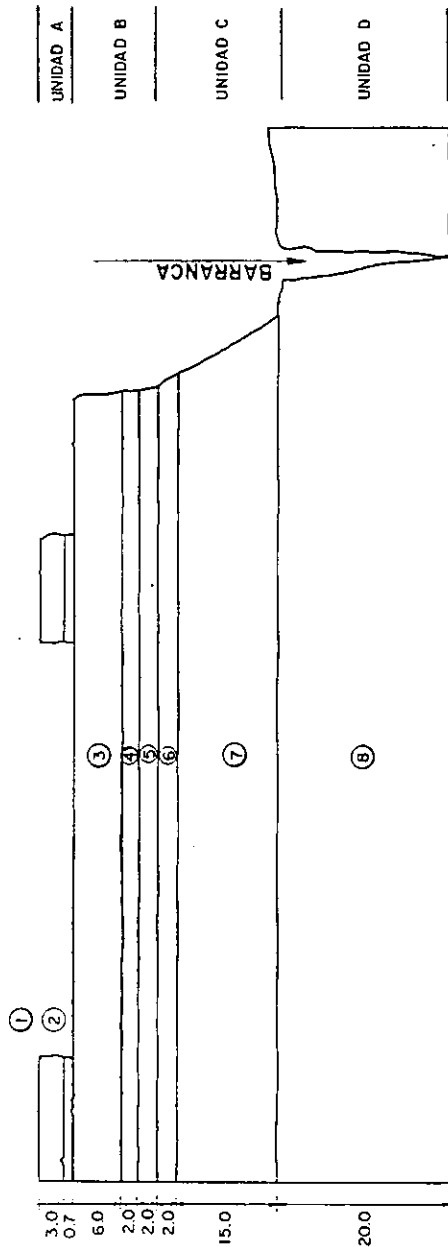
FIGURA 7.4

CONTACTOS FOTOGEOLÓGICOS



FIGURA 7.4 A

SECCION GEOLOGICA X-X'

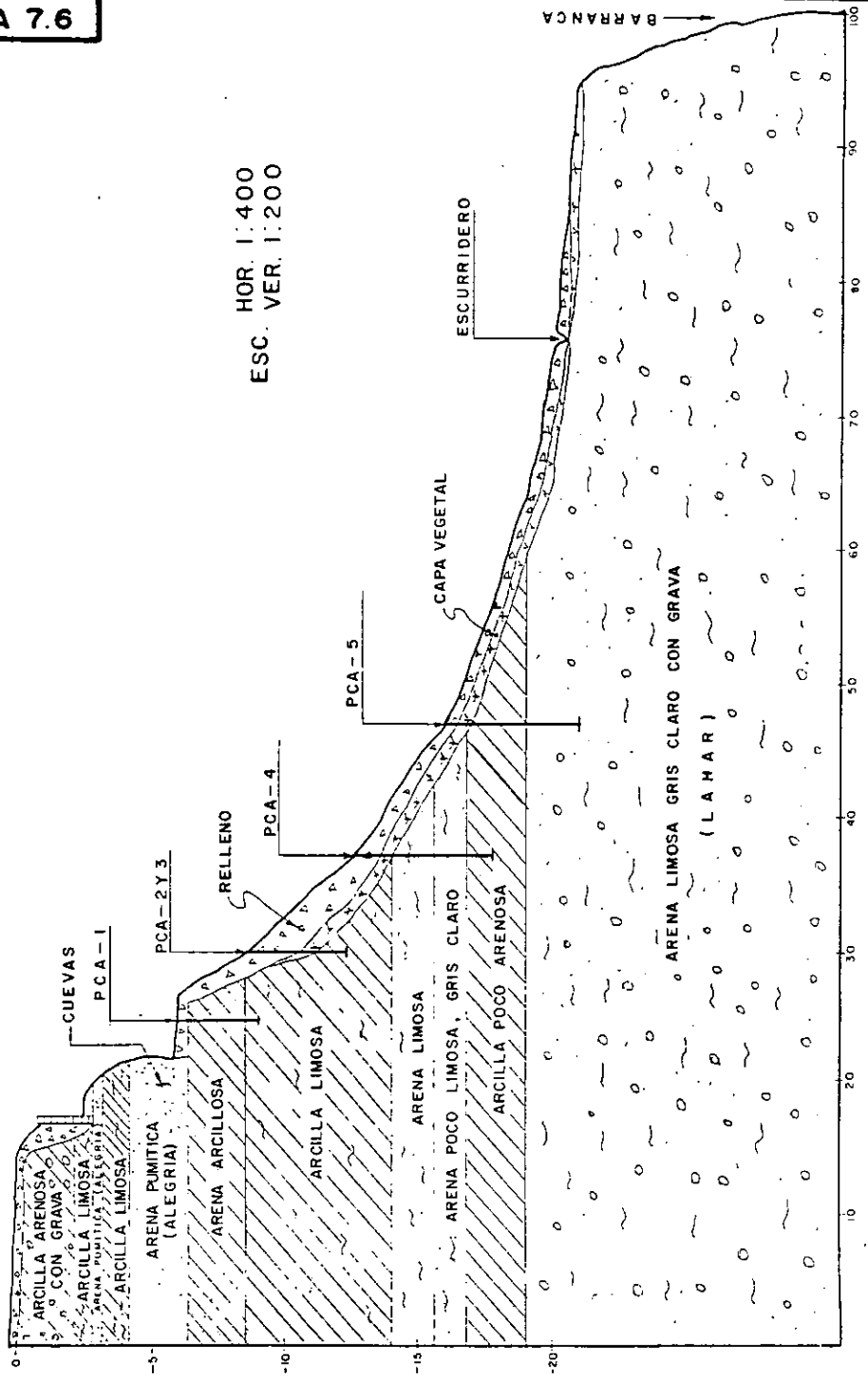


- UNIDAD A**
- ① Toba arcilla-arenosa café claro muy bien cementada que eventualmente se vuelve brechoide. Superficialmente presenta delgadas veillas de carbonato de calcio.
 - ② Toba arcillosa gris clara. Se agrieta visiblemente al quedar expuesta al aire.
- UNIDAD B**
- ③ Toba arcilla-arenosa café amarillento, a veces algo rojiza, bien cementada. Su mitad inferior suele ser más bien una brecha de Lahar fuertemente cementada.
 - ④ Toba arcilla-limosa café claro con intercalación de arena pumítica blancuzca.
 - ⑤ Toba arenosa, pumítica, café amarillento a blancuzco, medianamente cementada.
- UNIDAD C**
- ⑥ Toba arenosa café clara, medianamente compacta.
 - ⑦ Toba arcillosa café anaranjado. Eventualmente se vuelve brechoide o arenosa.
- UNIDAD D**
- ⑧ Brecha de Lahar bien cementada.

FIGURA 7.5

FIGURA 7.6

PERFIL ESTRATIGRAFICO DETALLADO



PERFIL GEOELECTRICO N° I (DIRECTO)

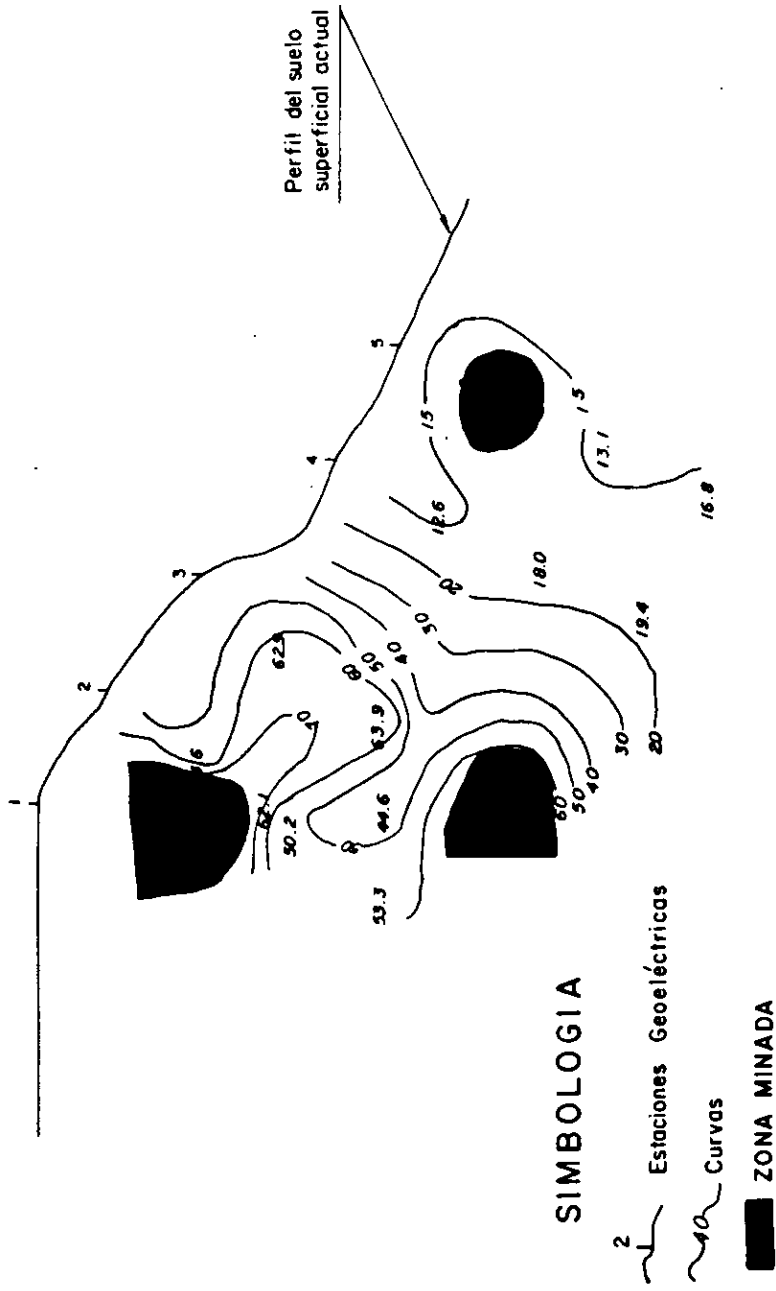


FIGURA 7.7

PERFIL GEOELECTRICO N° I (INVERTIDO)

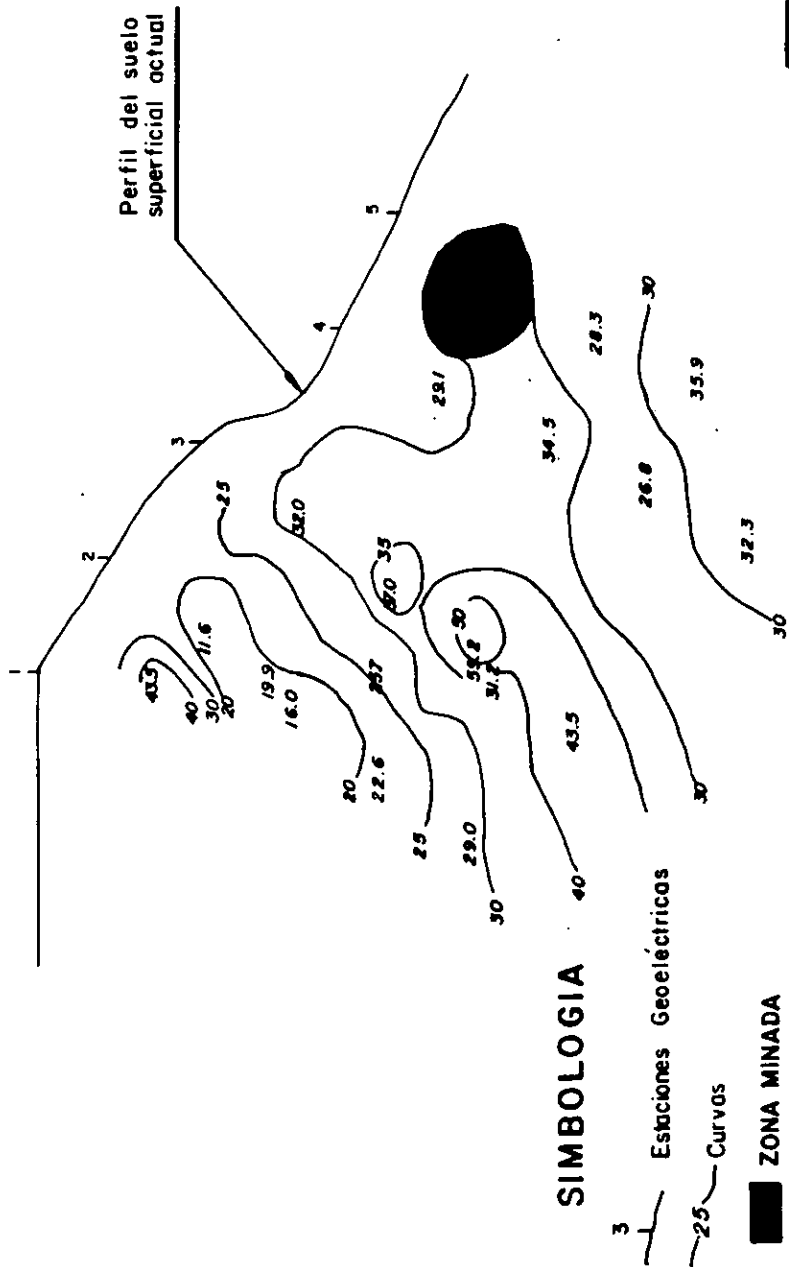


FIGURA 7.8

PERFIL GEOELECTRICO N° II (DIRECTO)

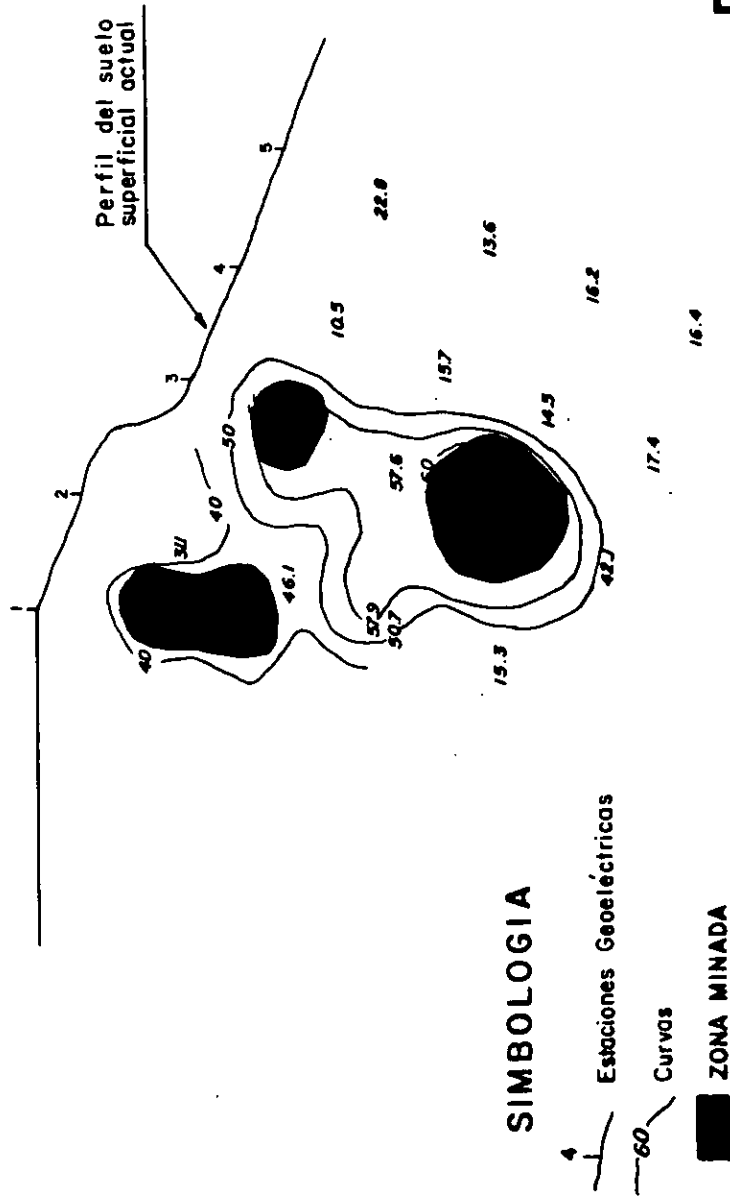


FIGURA 7.9

PERFIL GEOELECTRICO N° II (INVERTIDO)

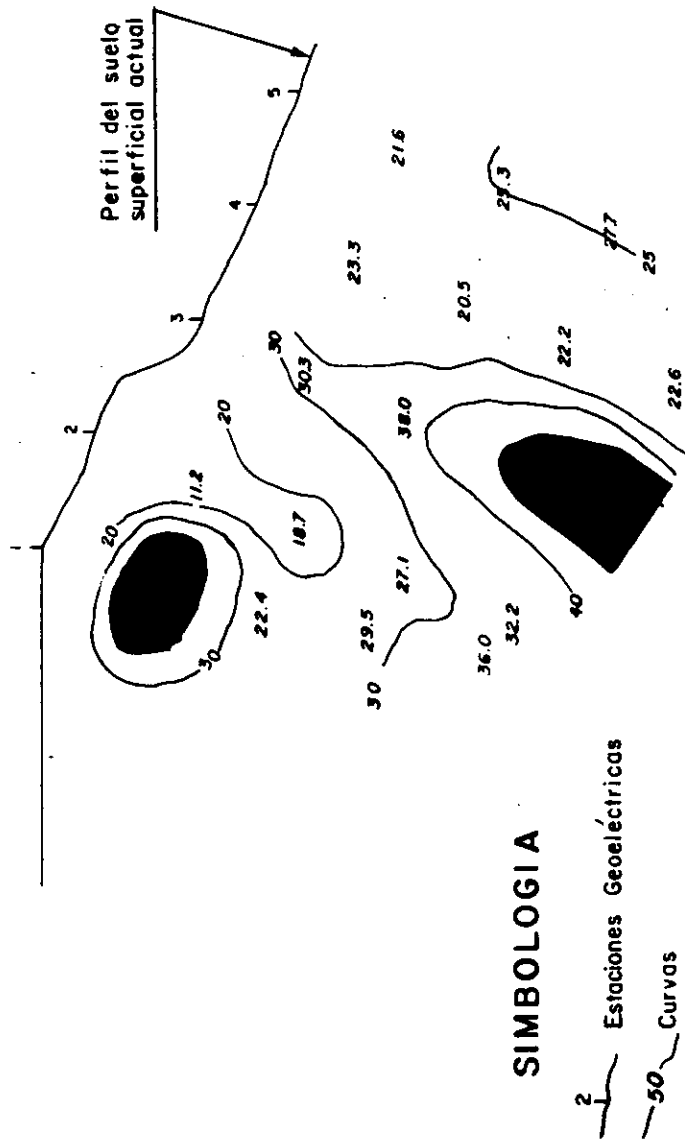
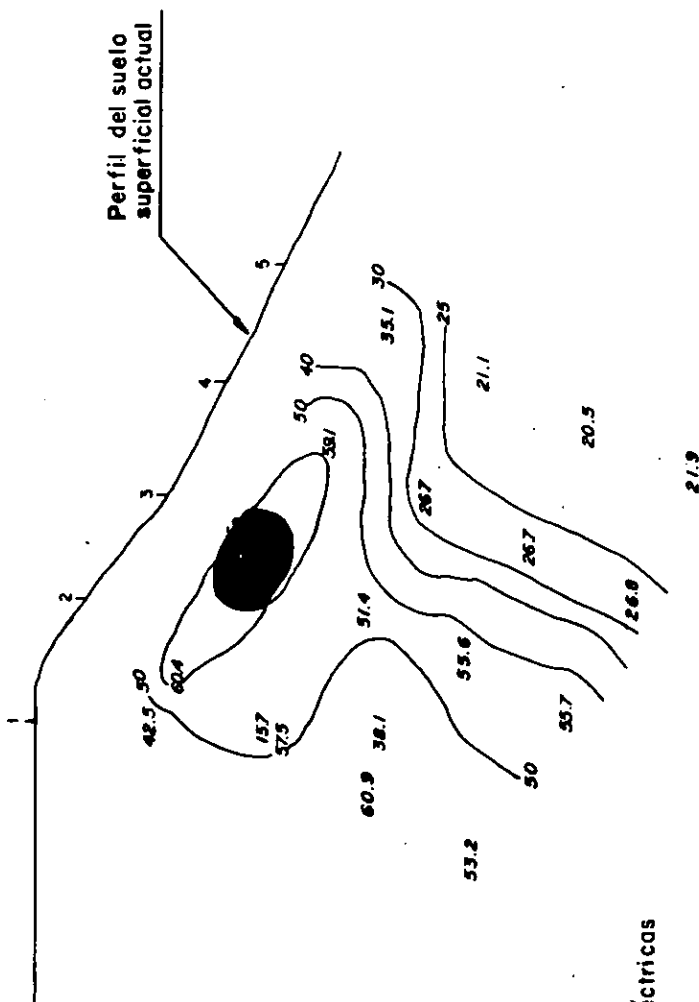


FIGURA 7.10

PERFIL GEOELECTRICO Nº III (DIRECTO)

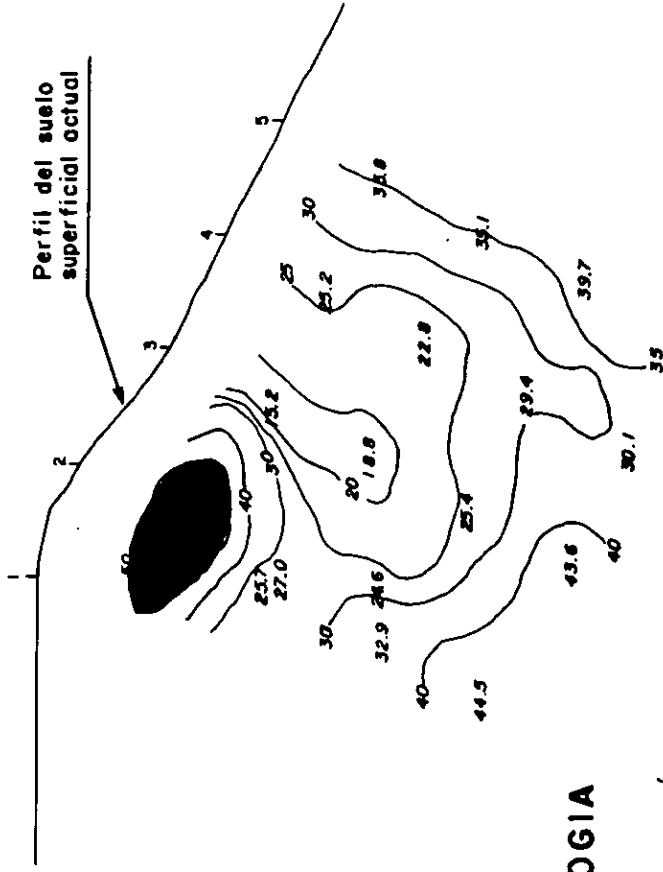


SIMBOLOGIA

- 5 — Estaciones Geoelectricas
- 40— Curvas
- ZONA MINADA

FIGURA 7.II

PERFIL GEOELECTRICO N° III (INVERTIDO)

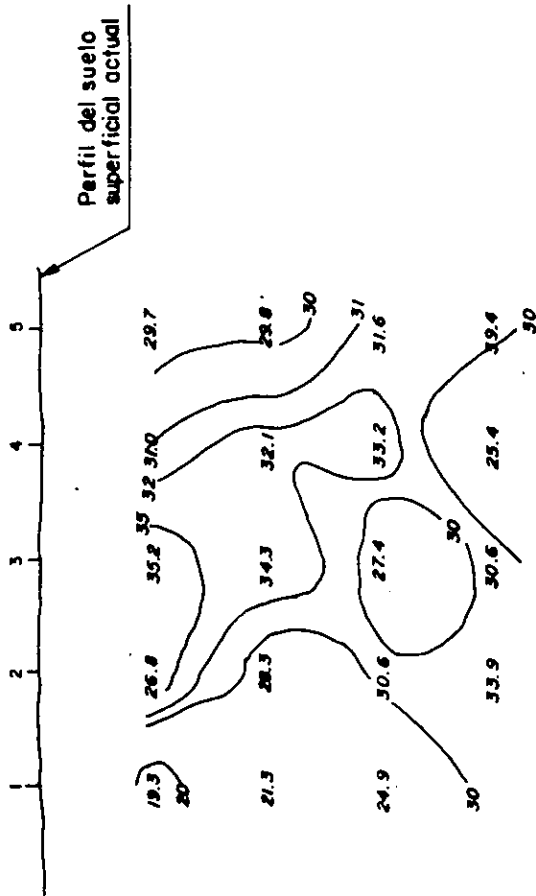


SIMBOLOGIA

- 3 Estaciones Geoelectricas
- 25 Curvas
- ZONA MINADA

FIGURA 7.12

PERFIL GEOELECTRICO Nº IV (DIRECTO)

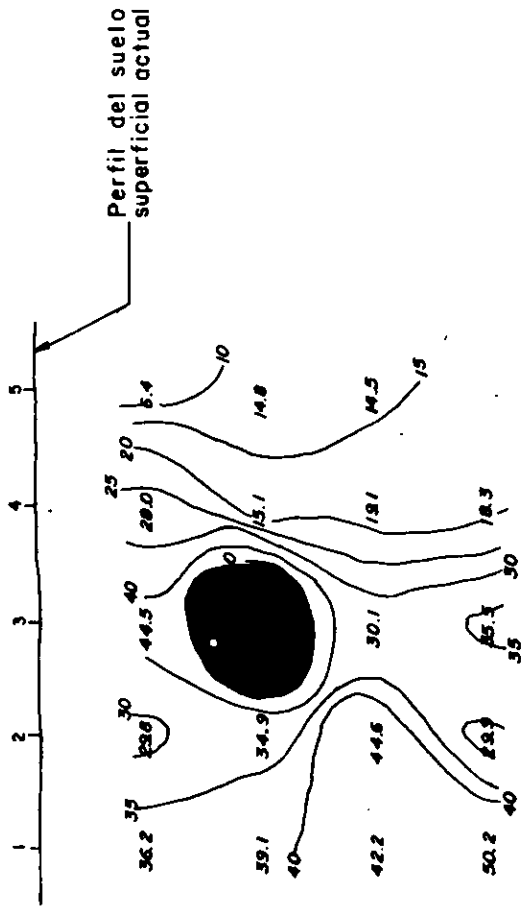


SIMBOLOGIA

- Estaciones Geoelectricas
- Curvas
- ZONA MINADA

FIGURA 7.13

PERFIL GEOELECTRICO N° IV (INVERTIDO)



SIMBOLOGIA

5 — Estaciones Geoelectricas

—30— Curvas

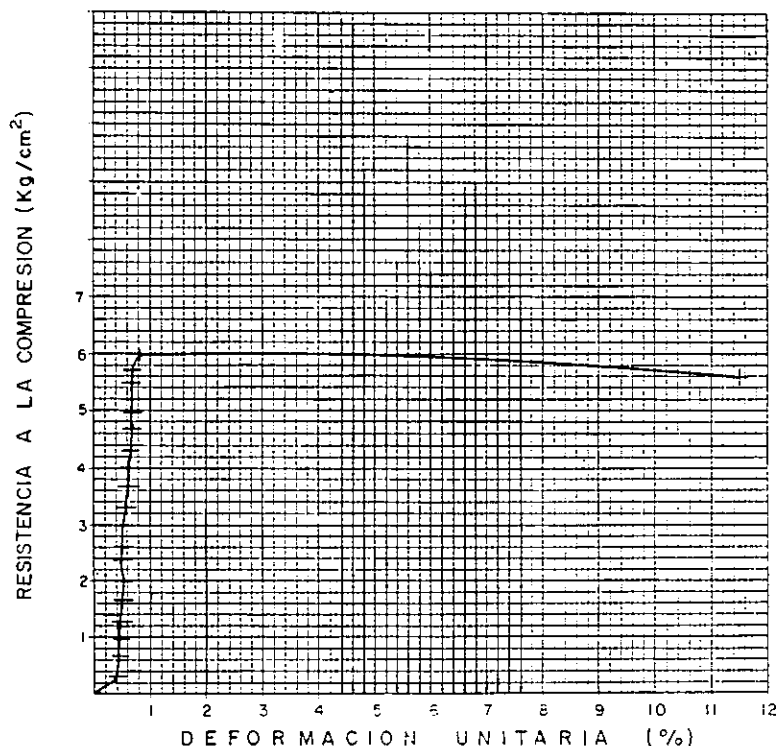
■ ZONA MINADA

PRUEBA DE COMPRESION AXIAL

SONDEO : PCA - I

MUESTRA : I

PROFUNDIDAD (m)	CONTENIDO DE AGUA (%)	DENSIDAD DE SOLIDOS —	RELACION DE VACIOS —	GRADO DE SATURACION (%)	DEFORMACION UNITARIA (%)	RESISTENCIA COMPRESION Kg / cm ²	PESOS VOLUMETRICOS	
							HUMEDO Kg / m ³	SECO Kg / m ³
0.0 - 1.0	39.39	2.696	1.90	55.89	0.81	6.002	1.297	930



Procedencia _____

Observaciones _____

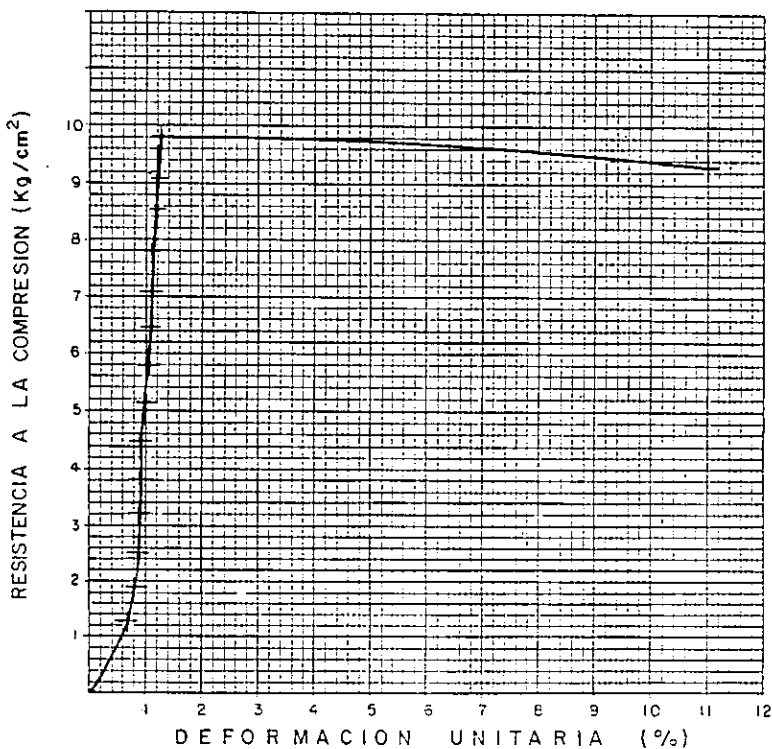
FIGURA 7.16

PRUEBA DE COMPRESION AXIAL

SONDEO: PCA - 1

MUESTRA: 2

PROFUNDIDAD (m)	CONTENIDO DE AGUA (%)	DENSIDAD DE SOLIDOS —	RELACION DE VACIOS —	GRADO DE SATURACION (%)	DEFORMACION UNITARIA (%)	RESISTENCIA COMPRESION Kg /cm ²	PESOS VOLUMETRICOS	
							HUMEDO Kg/m ³	SECO Kg/m ³
1.0 - 3.0	25.27	2.567	0.96	67.57	1.26	9.823	1.638	1.307



Procedencia _____

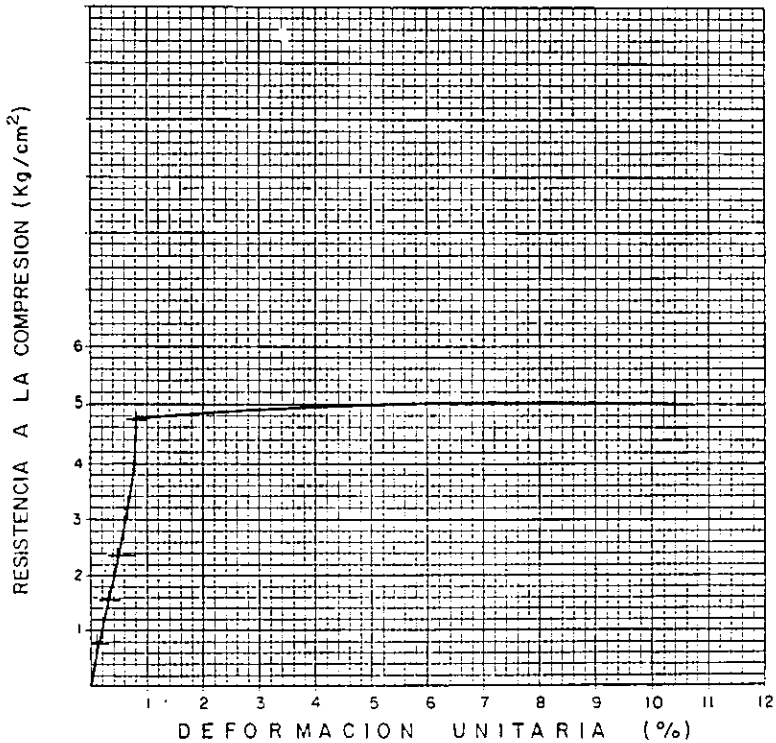
Observaciones _____

FIGURA 7.17

PRUEBA DE COMPRESION AXIAL

SONDEO: PCA - I MUESTRA: 3

PROFUNDIDAD (m)	CONTENIDO DE AGUA (%)	DENSIDAD DE SOLIDOS —	RELACION DE VACIOS —	GRADO DE SATURACION (%)	DEFORMACION UNITARIA (%)	RESISTENCIA COMPRESION Kg /cm ²	PESOS VOLUMETRICOS	
							HUMEDO Kg/m ³	SECO Kg/m ³
3.0 - 3.5	40.92	2.665	1.45	75.21	10.44	5.009	1.532	1.087



Procedencia _____

Observaciones _____

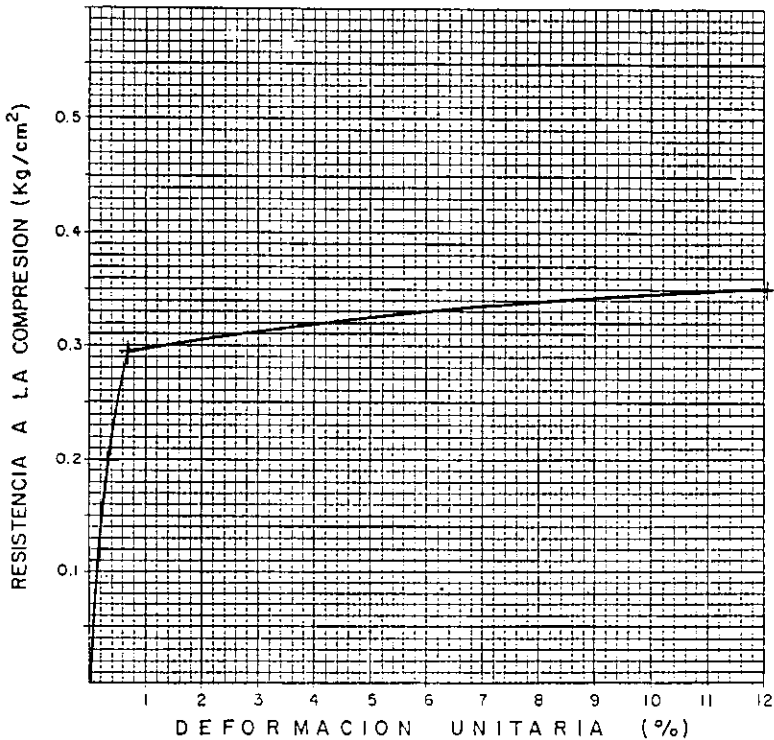
FIGURA 7.18

PRUEBA DE COMPRESION AXIAL

SONDEO: PCA - 2

MUESTRA: 5

PROFUNDIDAD (m)	CONTENIDO DE AGUA (%)	DENSIDAD DE SOLIDOS —	RELACION DE VACIOS —	GRADO DE SATURACION (%)	DEFORMACION UNITARIA (%)	RESISTENCIA COMPRESION Kg /cm ²	PESOS VOLUMETRICOS	
							HUMEDO Kg/m ³	SECO Kg/m ³
2.7 - 3.2	16.42	2.669	1.330	32.95	12.06	0.353	1.333	1.145



Procedencia _____

Observaciones _____

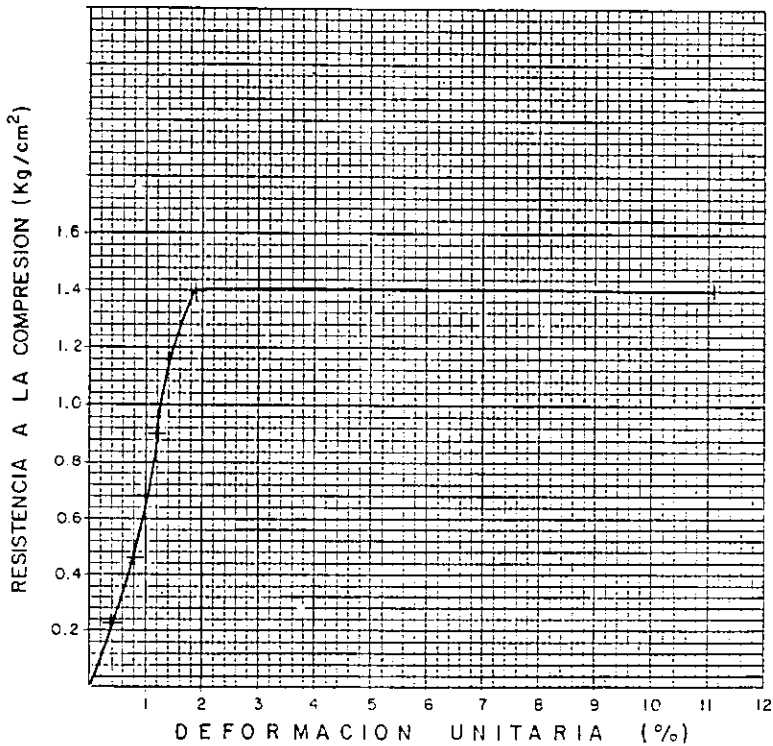
FIGURA 7.19

PRUEBA DE COMPRESION AXIAL

SONDEO: Caverna

MUESTRA: 15

PROFUNDIDAD	CONTENIDO DE AGUA	DENSIDAD DE SOLIDOS	RELACION DE VACIOS	GRADO DE SATURACION	DEFORMACION UNITARIA	RESISTENCIA COMPRESION	PESOS VOLUMETRICOS	
							HUMEDO	SECO
(m)	(%)	—	—	(%)	(%)	Kg /cm ²	Kg/m ³	Kg/m ³
PILAR	55.33	2.650	0.604		11.09	1.414		



Procedencia _____

Observaciones _____

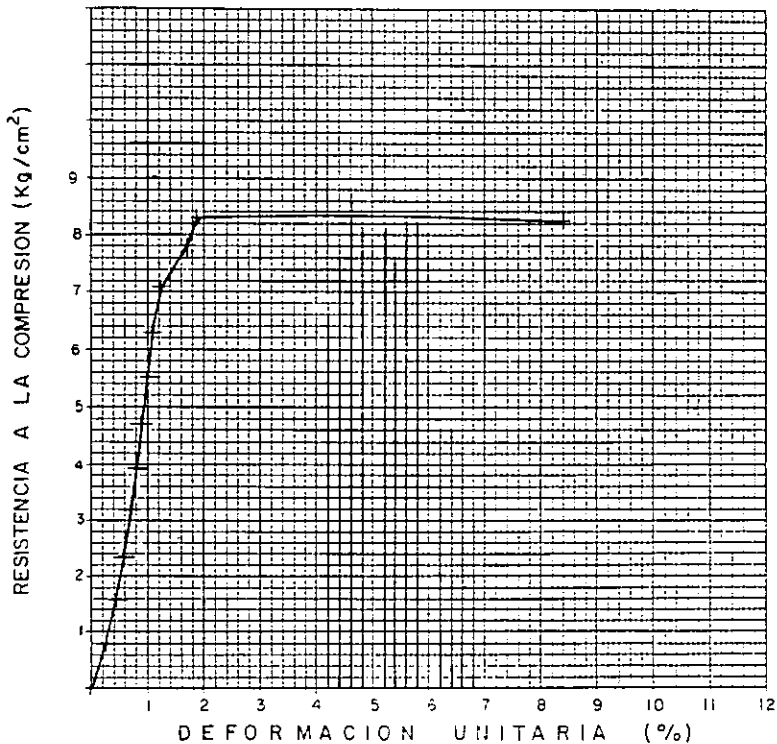
FIGURA 7.20

PRUEBA DE COMPRESION AXIAL

SONDEO: Caverna

MUESTRA: 16

PROFUNDIDAD (m)	CONTENIDO DE AGUA (%)	DENSIDAD DE SOLIDOS —	RELACION DE VACIOS —	GRADO DE SATURACION (%)	DEFORMACION UNITARIA (%)	RESISTENCIA COMPRESION Kg /cm ²	PESOS VOLUMETRICOS	
							HUMEDO Kg/m ³	SECO Kg/m ³
TECHO	22.02	2.719	0.960	62.37	1.85	8.319	1.689	1384



Procedencia _____

Observaciones _____

FIGURA 7.21

PERFIL DE SUELOS

SONDEO PCA-3

PROF. (m)	PERFIL	CONTENIDO DE AGUA (W)				DESCRIPCION
		20	40	60	80	
1						RELLENO, ARENA LIMOSA, -- CAFE, MUY SUELTA.
2						G=6 S=81 F=13
3			•	△	○	ARCILLA ARENOSA, CAFE OS- CURO, MUY PLASTICA, CON - RAICES.
4						ARCILLA ARENOSA, CAFE - ROJIZO, DE CONSISTENCIA DURA.
5						
6						

PROF. DEL SONDEO.



SUELO VEGETAL



GRAVA



ARCILLA



LIMO



ARENA

G=% DE GRAVA

S=% DE ARENA

F=% DE FINOS

FIGURA 7.24

CONCLUSIONES

Este trabajo mostró básicamente la importancia que resulta utilizar los métodos geofísicos para los fines que convienen a la Ingeniería Civil, vistos como herramientas de trabajo capaces de simplificar problemas de índole técnica, de tiempo y de esfuerzo, entre otros.

Con los elementos ya descritos, podemos concebir a los métodos geofísicos (conocidos también como métodos indirectos), como la forma de poder obtener datos del subsuelo o que simplemente se tenga la certeza de llegar a ellos, ya sea, en puntos de fácil o de difícil acceso. Aunado a ello, los datos obtenidos de campo requieren del uso de la imaginación y el ingenio necesarios en la interpretación y posterior correlación que permitan ofrecer un panorama claro de un ambiente físico extenso, sin la necesidad de que todas sus partes sean tangibles, pero que puedan ser visualizadas en su conjunto, mostrando resultados reales y confiables.

Es un error frecuente el pretender que los métodos geofísicos substituyan a los métodos directos o viceversa. Como ya se ha visto esos deben ser complementarios para alcanzar el objetivo primordial del ingeniero civil en la etapa de investigación que es la caracterización geotécnica utilizando y optimizando los recursos disponibles. Por ello, aunque con los métodos geofísicos se obtienen resultados que abarcan grandes extensiones de terreno, se hace incapie, en que esto no excluye el uso de algún método de exploración directa. Si se tiene información extensa sobre algún terreno, también es necesario contar con muestras físicas tomadas de puntos específicos del terreno mismo, que ayuden a soportar aún más la información obtenida y le den a ésta un carácter integral. De esta forma, se concluye que los métodos directos e indirectos no se substituyen, sino que se complementan entre sí.

En realidad los problemas más comunes que se deben afrontar en la utilización de los métodos geofísicos son los de tipo técnico y económico. Técnicamente podemos iniciar planteando el problema en términos geológicos y geotécnicos; recopilar información de toda índole del área por estudiar; enseguida podíamos decidir sobre la elección del método geofísico y su modalidad; programar y ejecutar el trabajo de campo; después procesar la información y finalmente interpretar los datos geofísicos y correlacionarlos con la geología y la geotecnia.

Cabe hacer mención que los métodos de prospección geofísica deben utilizarse de acuerdo a los objetivos que se persiguen, dado que es evidente que dependiendo de este objetivo existen métodos que son adecuados. En forma general, se puede decir que si se trata de encontrar parámetros de resistencia, deformación y rigidez, los métodos sísmicos resultan más apropiados; en cambio, si se trata de definir condiciones litoestratigráficas, presencia de agua subterránea, existencia de oquedades o cavidades en el subsuelo, el método de tipo eléctrico es más recomendable.

Hasta el momento, la mayoría de los trabajos que requieren el uso de un método geofísico han sido directamente vinculados con el estudio del subsuelo, de allí que la geotecnia tenga un papel preponderante. Sin embargo, esta orientación no indica que sea de uso exclusivo para un área en particular de la ingeniería civil, ya que, precisamente es "el ingenio" quien ha marcado la pauta para abrir camino hacia otras aplicaciones en las áreas de hidráulica, estructuras, construcción, ingeniería ambiental, entre otras.

ANEXO

TEORÍA DEL FLUJO DE CORRIENTE

Es necesario conocer el comportamiento del flujo de corriente en medios estratificados, y el modo en que este comportamiento afecta a la distribución del potencial. El punto de partida para la resolución de este tipo de problemas es la ley de Ohm

$$\frac{\Delta V}{l} = R$$

donde l es la intensidad de corriente que atraviesa un cuerpo conductor, ΔV la diferencia de potencial entre dos superficies a potencial constante y R una constante llamada resistencia entre dichas superficies.

El concepto de resistividad se define cuando un flujo de líneas paralelas de corriente atraviesa normalmente un conductor de sección transversal A , entonces su resistividad ρ se define como

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

donde R es la resistencia medida entre dos superficies equipotenciales separadas una distancia L . De estas dos ecuaciones, se deduce que la intensidad de corriente que atraviesa la superficie A es

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \Delta V \cdot \frac{A}{\rho L}$$

que la "densidad de corriente" j viene dada por

$$j = \frac{I}{A} = \frac{\Delta V}{\rho L}$$

Si las líneas de flujo no son paralelas, la densidad de corriente en el conductor no es uniforme, el razonamiento anterior sigue siendo igualmente válido con solo considerar un elemento infinitesimal de conductor limitado por superficies equipotenciales que pueden ser curvas. En el límite, la razón $\Delta V / L$ es el gradiente de potencial dV/dL , y la ley de Ohm adopta la forma.

$$j = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dV}{dL}$$

Donde el signo menos proviene de que el potencial y el flujo de corriente varían en sentidos opuestos. El valor de la componente de la densidad de corriente en una cierta dirección r viene dado por

$$j_r = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial r}$$

Es de destacar que en un medio homogéneo, un aumento de la densidad de corriente, representado por la mayor proximidad o convergencia de las líneas de corriente, significa un aumento en el valor del gradiente del potencial. Por el contrario, una divergencia de dichas líneas supone una disminución del gradiente. El paso siguiente en el desarrollo de esta teoría sería deducir el potencial en un medio homogéneo debido a una fuente puntual de corriente (evidentemente se tratará de una "fuente" positiva de flujo de corriente y en algún otro punto deberá existir un "sumidero" negativo como acostumbra a llamarse, pero aquí se supone que el "sumidero" se encuentra lo suficientemente distante como para que su efecto sea despreciable). El potencial debido a la fuente en un punto que diste r de ella viene dado por

$$V = \frac{S}{r}$$

donde S es una constante que puede considerarse como la intensidad de la fuente. El valor de S depende de la resistividad, la corriente y la situación de la fuente. Supóngase que el medio sea de extensión indefinida. Considérese la corriente que fluye al exterior a través de una superficie esférica de radio r de centro la fuente. La corriente que fluye a través de un metro cuadrado de la superficie esférica es

$$j = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{r^2}$$

Puesto que la densidad de corriente es constante sobre la superficie esférica, la intensidad de corriente será:

$$I = 4\pi r^2 \cdot \frac{S}{\rho r^2}$$

por lo tanto

$$I = \frac{4\pi S}{\rho}$$

$$S = \frac{I\rho}{4\pi}$$

Si ahora se supone que el medio es solo semi-infinito y que esta limitado por una superficie plana que lo separa del aire, que puede considerarse que tiene una resistividad infinita y que la fuente esta situada en la interfaz, se obtiene un resultado diferente. De hecho estas son las condiciones reales que se dan en la practica de la prospección de resistividades. Como antes, será

$$V = \frac{S}{r}$$

pero, bajo estos supuestos, como la corriente fluye sólo a través de una semiesfera es

$$S = \frac{I\rho}{2\pi}$$

Es decir, la intensidad de la fuente es, como podría esperarse, el doble que en el caso precedente.

Si en un punto de la superficie que diste r de la fuente se mide el gradiente del potencial, entonces a partir de este valor y del conocimiento de la intensidad de corriente que penetra al terreno por la fuente, puede determinarse el valor de la resistividad.

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

por lo tanto

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{I\rho}{2\pi r^2}$$

por lo tanto

$$\rho = -\frac{2\pi r^2}{I} \cdot \frac{\partial V}{\partial r}$$

(como $\partial V / \partial r$ e I son de signos contrarios el valor de ρ resulta siempre positivo). En la practica el valor del gradiente del potencial en un punto se obtiene, de forma muy aproximada, midiendo la diferencia de potencial entre dos electrodos muy próximos colocados simétricamente respecto al punto en cuestión y en línea con la fuente. Si ΔV es la diferencia de potencial entre los dos electrodos e ΔL la distancia entre ellos, el gradiente de potencial viene dado por $\Delta V / \Delta L$.

BIBLIOGRAFÍA

- Benhumea, M., Vázquez, A. Simposio de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Estudios Geofísicos del Valle de México. Comisión Federal de Electricidad. México D.F. 1988.
- Cantos Figueroa, José. Tratado de Geofísica Aplicada. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España 1974.
- Dobrin Milton, Burnett. Intriducción a la Prospección Geofíica. 2a. Edición. Editorial Omega. Madrid España.
- Figueroa. Determinación de las Constantes de Arcilla del Valle de Mexico por Prospección Sísmica. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. México. D.F. 1964.
- Grant, F.S. , West, G.F. Interpretation Theory in Applied Geophysics. Mc Graw Hill. United States of America.
- Griffiths, D.H. , King, R.F. Geofísica Aplicada para Ingenieros y Geólogos. Editorial Paraninfo. Madrid España 1972.
- Harvey, J.C. Geología para Ingenieros Geotécnicos. Editorial Limusa. México D.F. 1987. Primera Edición.
- Iakubovskli, I.U.V. , Liajov, L.L. Exploración Eléctrica. Editorial Reverté. Barcelona España 1979.
- Keller, George V. , Frischknecht, Frank C. Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Editorial Perganon. Great Britain. 1977.
- Legget, Robert F. Geología Aplicada a la Ingeniería Civil. Editorial Mc Graw Hill. México D.F. 1986.
- Ramírez, J.E. Prospección Geofísica Tomo I . Universidad Nacional de Bogotá Colombia. Colombia 1975.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas. Simposio: exploración y muestreo en roca. Octubre 12,13 y 14 de 1978. México D.F.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Reunión Técnica : Geofísica Aplicada a la Geotécnia. México D.F. 1985.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Cimentaciones en Zonas Minadas de la Ciudad de México. Simposio marzo de 1976. México D.F.

REFERENCIAS

1. Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas. Simposio: exploración y muestreo en roca. Octubre 12,13 y 14 de 1978. México D.F.
2. Dobrin Milton, Burnett. Intriducción a la Prospección Geofísica. 2a. Edición. Editorial Omega. Madrid España.
3. Grant, F.S. , West, G.F. Interpretation Theory in Applied Geophysics. Mc Graw Hill. United States of America.
4. Harvey, J.C. Geología para Ingenieros Geotécnicos. Editorial Limusa. México D.F. 1987. Primera Edición.