EDIFICACIÓN

Tema 3 Cimentaciones y excavaciones

3.1 Suelos, trabajos de campo y laboratorio

Autores;

M.I. José Alonso Alanis Rojas

Luis Gerardo Alfaro Hernández

ÍNDICE

Introducción....1

3.1.1 Etapa de Exploración....2

3.1.1.1 Revisión de Antecedentes....2

3.1.1.2 Reconocimiento de Campo....4

3.1.1.3 Reconocimiento de Sitio....6

3.1.2.1 Clasificación S.U.C.S....6

3.1.2.2 Ensayes de Laboratorio....10

3.1.2.3 Zonificación Geotécnica....13

3.1.3 Determinación de las Propiedades del Suelo en el Laboratorio....15

3.1.3.1 Métodos de Exploración....15

3.1.3.1.1 Métodos Indirectos....15

3.1.3.1.2 Métodos Directos....17

3.1.3.2 Requisitos Mínimos de Exploración....19

3.1.3.2.1 Construcciones Ligeras o Medianas de Poca Extensión y con Excavaciones Someras....20

3.1.3.2.2 Construcciones Pesadas, Extensas o con Excavaciones Profundas....20

3.1.3.2.3 Requisitos Específicos para la Ciudad de México en Caso de Falla Geológica....22

3.1.4 Interpretación y Análisis....22

3.1.4.1 Informe Geotécnico....22

3.1.4.2 Memoria de Diseño Geotécnico....24

3.1.5 Mejoramiento de Suelos....25

3.1.5.1 Sustitución. 25
3.1.5.2 Compactación Dinámica. 26
3.1.5.3 Vibrocompactación. 26
3.1.5.4 Precarga. 27
3.1.5.5 Congelación de Suelos. 28
3.1.5.6 Inyecciones. 29
3.1.6 Caso de estudio: Proyecto Mítikah. 29
3.1.6.1 Ubicación geotécnica. 31
3.1.6.2 Exploración geológica y geotécnica 32
3.1.6.3 Toma de decisión, proceso constructivo 33
Conclusiones Capitulares 35
Bibliografía 36
Índice de Figuras 41
Índice de Tablas 42

Introducción

El estudio de la mecánica y dinámica del suelo no debería considerarse como un aspecto secundario en el proceso constructivo de un proyecto. De hecho, constituye la base misma, ya que, la estabilidad y resistencia de cualquier estructura dependen en gran medida de la calidad y características del suelo sobre el que se construye.

En esta sección, se abordarán conceptos importantes para comprender diversos temas relacionados con la clasificación, estudios y normatividad de los suelos, útiles para la realización de obras de edificación en diferentes contextos.

El conocimiento de las características de los suelos se adquiere a través de un proceso de exploración que utiliza una variedad de métodos, comenzando desde la fase inicial de evaluación del terreno y continuando hasta alcanzar un nivel de información que permita tomar decisiones fundamentales con confianza y precisión. La exploración del suelo abarca una serie de técnicas y herramientas, que van desde la observación visual y el muestreo físico hasta técnicas más avanzadas como la geoquímica y la geofísica.

Al entender las características del suelo, los ingenieros podemos optimizar tanto los recursos humanos, económicos, así como los materiales disponibles, lo anterior, se traduce en una planificación más eficiente de los procesos constructivos, una reducción de los costos asociados a errores, correcciones, y claramente, en la creación de edificaciones más seguras y resilientes frente a las fuerzas naturales y los efectos del tiempo.

3.1.1 Etapa de Exploración

El objetivo principal de la etapa de exploración de suelos para la realización de obras de edificación es recopilar información detallada sobre las características y propiedades del suelo presente en el sitio donde se desarrollarán los procedimientos constructivos.

La exploración de suelos en geotecnia es esencial para comprender su comportamiento bajo diversas condiciones y tomar decisiones informadas en el diseño y construcción de proyectos de ingeniería civil.

El propósito principal de estas fases de exploración es identificar las condiciones geotécnicas del sitio de construcción mediante actividades destinadas a recopilar la información necesaria para realizar una caracterización adecuada.

El plan de exploración se diseñará considerando los siguientes aspectos:

- Tipo de edificación
- Importancia del proyecto
- Naturaleza de la zona geológica
- Profundidad prevista de excavaciones
- Finalidad de los datos de la exploración y el muestreo

3.1.1.1 Revisión de Antecedentes.

Previamente al reconocimiento del sitio, se llevará a cabo una recopilación de información proporcionada por dependencias u organismos que la hayan desarrollado; esta información detallada en la tabla 1, debe ser rigurosamente analizada y sintetizada para obtener datos relacionados con la topografía, hidrología, estratigrafía y los problemas geotécnicos característicos de la región.

Tabla 1. *Información por consultar durante los estudios preliminares*

Área	Información necesaria	Dependencia
Topografía	• Mapas topográficos • Fotografías aéreas	• Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)
Geología	• Mapas • Mapas geológicos • Informes y memorias geológicas • Mapas edafológicos • Fotografías aéreas	• Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) • Instituto de Geología UNAM
Geotecnia	• Publicaciones geotécnicas • Informes geotécnicos • Mapas geotécnicos	• Instituto de Ingeniería UNAM (IIUNAM) • Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG) • Centro Nacional de prevención de Desastres (CENAPRED) • Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR) • Secretaria de Comunicación y Transporte (SCT) • Petróleos Mexicanos (PEMEX) • Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) • Comisión Federal de Electricidad (CFE) • Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM) • Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) • Secretaría de Desarrollo Urbano y Vialidad (SEDUVI) • Secretaria de Energía (SENER)

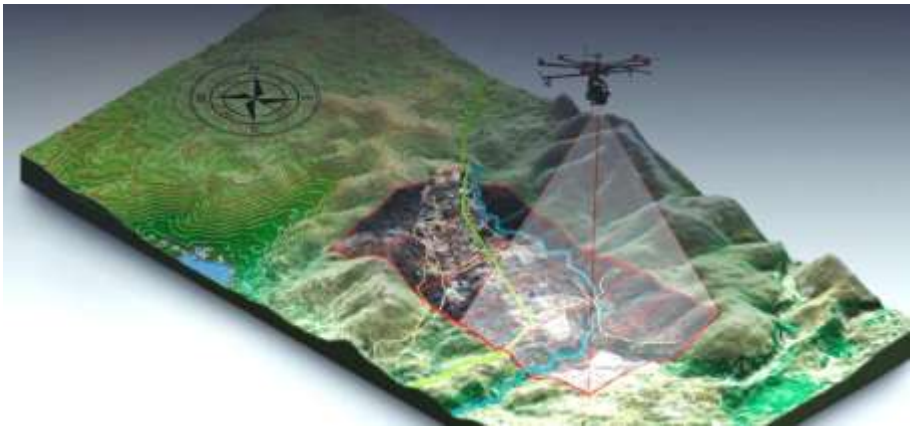
Hidrogeología e hidrología	• Registros pluviométricos y de temperaturas	• Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) • Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) • Secretaría de Energía (SENER)
Datos meteorológicos	• Mapas hidrogeológicos • Mapas topográficos • Fotografías aéreas • Datos de pozos y sondeos	• Instituto de Geofísica UNAM Servicio Meteorológico Nacional (SMN) • Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)
Datos sísmicos	• Datos de terremotos y normas sismorresistentes	• Instituto de Ingeniería UNAM • Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG) • Instituto de Geofísica UNAM • Servicio Sismológico Nacional • Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica
Minería y carreteras	• Mapas de rocas industriales • Registro de minas y canteras • Mapas e inventarios	• Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) • Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) • Secretaría de Movilidad (SEMOVI)

Nota: Adaptado de *CFE Manual de Diseño de Obras Civiles B.2.1: Caracterización de los depósitos de suelo* (p. 42), por E. Ovando Shelley, M. del C. Cabrera Velásquez, M. G. Olín Montiel, N. del P. Parra Piedrahita, 2008, Instituto de Ingeniería UNAM.

3.1.1.2 Reconocimiento de Campo.

Durante la etapa de reconocimiento e inspección visual del sitio donde se construirá, se llevan a cabo una serie de actividades destinadas a recopilar información general sobre las condiciones del terreno y el entorno. Estas actividades son fundamentales para comprender el contexto geotécnico y geológico del sitio de construcción antes de proceder con estudios más detallados, como se puede ver en la simulación de su uso en la figura 1.

Figura 1. *Exploración del entorno con dron*



Nota: Adaptado de *Levantamiento topográfico con drones: ¿Cómo se realiza y cuál es su valor agregado?* [Imagen], por UAVLATAM, 2022, (https://uavlatam.com/blog/page/2/).

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias – Cimentaciones (2023), durante la etapa de reconocimiento y visita al sitio de construcción deberán observarse y registrarse cuidadosamente las características físicas relevantes del área, incluyendo:

- *Localización del terreno*: Dimensiones y estado de los caminos de acceso, así como los derechos de paso necesarios para el equipo y el personal involucrado en la campaña de exploración geotécnica. Además, disponibilidad de energía y agua en el sitio.
- *Condiciones topográficas:* Configuración de la superficie del terreno, incluyendo excavaciones, zanjas, colinas, valles, túneles, cortes y caminos, así como las condiciones de la superficie, tales como encharcamientos y rellenos. Tipos de suelos y rocas en afloramientos, presencia de suelo orgánico.
- *Tipo de vegetación:* Presencia o ausencia de vegetación.
- *Condiciones climáticas:* Niveles de precipitación, riesgo de inundaciones, estado del drenaje, probabilidad de granizo, eventos de congelación, entre otros factores climáticos.
- *Entrevistas a vecinos o asociaciones:* Identificación de problemas estructurales en las viviendas, presencia de cavernas o minas, usos previos del terreno, existencia de tiraderos, historial de inundaciones y demoliciones, entre otros aspectos relevantes.

3.1.1.3 Reconocimiento de Sitio.

El reconocimiento del sitio permite evaluar la información previamente recopilada por el ingeniero especializado en mecánica de suelos, acompañado de un experto en geología, y complementarla con observaciones de campo. Este proceso es crucial para determinar la viabilidad de la construcción de una obra civil y para fundamentar el programa detallado de exploración.

El reconocimiento de campo debe proporcionar información sobre la accesibilidad, los recursos humanos y materiales disponibles en el sitio, permitir el entendimiento del entorno geológico general, identificar las estructuras geológicas como fallas, fracturas, fisuras y rellenos, y clasificar los suelos superficiales. También debe evaluar la geomorfología, los procesos erosivos actuales, el tipo de drenaje superficial y subterráneo, y el espesor del suelo.

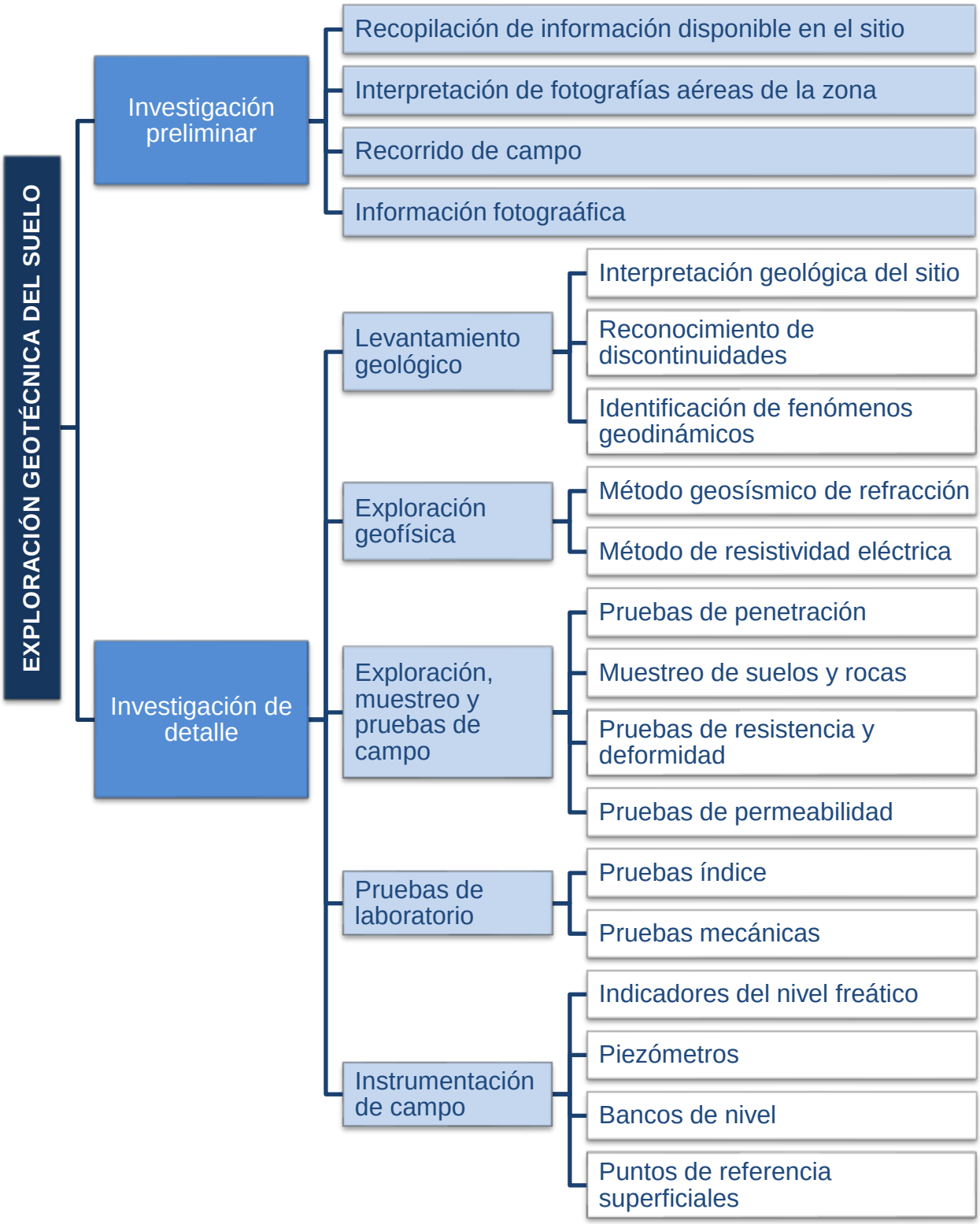
Para estudiar un sitio es esencial llevar a cabo la investigación en dos fases; investigación preliminar e investigación de detalle. En la figura 2, se presenta un esquema básico con las actividades principales que se realizan durante cada una de las etapas.

3.1.2.1 Clasificación S.U.C.S

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, propuesto por Arthur Casagrande (1942) para su uso en la construcción de aeródromos durante la Segunda Guerra Mundial y en el año de 1948 fue presentado como un sistema de clasificación de suelos. Este método divide a los suelos en grupos que exhiben intervalos de propiedades mecánicas e hidráulicas semejantes.

El método SUCS que se muestra en la figura 3, proporciona una forma estandarizada y sistemática de clasificar los suelos en función de sus propiedades físicas y características de ingeniería, lo que facilita la comunicación y comprensión entre los profesionales de la geotecnia y la ingeniería civil.

Figura 2. *Exploración geotécnica*

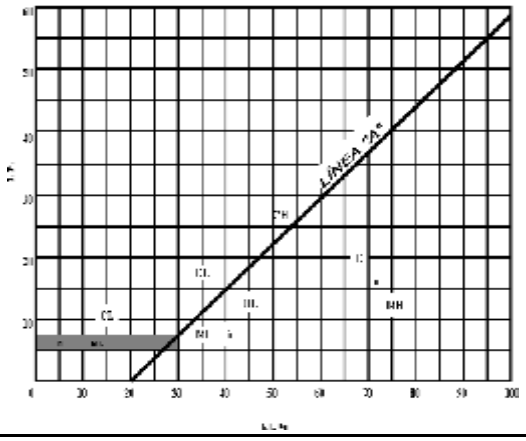


Nota: Adaptado de *Manual de Cimentaciones Profundas.* E. Santoyo, 2001, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. (p. 28).

Figura 3. *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.)*

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)

INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR					SÍMBOLO		NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO	
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ⊕	Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No.200) s on, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4	PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVAS LIMPIA Poco o nada de partículas finas	**GW**		Gravas bien graduadas,mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	DETERMÍNESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%:GW,GP,SW,SP; más del 12%: GM,GC,SM,SC. Entre 5% y 12%: Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles **	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60} / D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$
					GP		Gravas mal graduadas,mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.
				GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* GM	d	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo		LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. / Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
						u			
					GC		Gravas arcillosas,mezclas de gravas,arena y arcilla		LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4		ARENA LIMPIA Poco o nada de partículas finas	SW		Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		$Cu = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3.
					SP		Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW
				ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* SM	d	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. / Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
						u			
					SC		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.		LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.
SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ⊕		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50			ML		Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad	
					CL		Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.) 	
					OL		Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50			MH		Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.		
					CH		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.		
					OH		Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		
		SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS			P		Turbas y otros suelos altamente orgánicos.		

** CLASIFICACIÓN DE FRONTERA- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS; POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.

⊕ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.

* LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d Y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS UNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFIJO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFIJO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

Nota: Adaptado de *Tabla Clasificación SUCS* [Tabla], por Joel Minaya Soto, 2024, UDOCZ (https://www.udocz.com/apuntes/107471/tabla-clasificacion-sucs).

Algunos de los criterios principales que intervienen en dicha clasificación son:

1. *Composición del suelo:* Los suelos están formados por partículas de diferentes tamaños, desde grandes cantos rodados hasta finas partículas de arcilla coloidal, incluyendo gravas, arenas, limos y arcillas.
2. *Propiedades del suelo:* Las propiedades mecánicas e hidráulicas dependen de la interacción entre las partículas, influenciada por:
   - *Granulometría:* La distribución de los tamaños de partículas.
   - *Plasticidad:* Una característica de las partículas coloidales en la fracción más fina del suelo (partículas menores de 0.075 mm).

El ingeniero supervisor garantizará que las muestras cumplan con los estándares de calidad y compilará los datos de los sondeos, completando los registros de campo. Para optimizar la tarea, se pueden usar las abreviaturas y símbolos de la tabla 2.

Tabla 2. *Abreviaturas complementarias para formular los registros de campo*

Abreviaturas	Significado
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de los suelos
G	Grava
S	Arena
M	Limo
C	Arcilla
O PT	Suelo Orgánico
W	Turba
P	Bien graduado
L	Mal graduado
H	Alta plasticidad
SPT	Prueba de penetración estándar
N	Número de golpes en SPT

Abreviaturas	Significado
NF	Nivel freático
PCA	Pozo a cielo abierto
BT	Broca ticónica
DG	Broca tipo Drag
F-3	Muestra alterada en frasco número 3
B-4	Muestra alterada en bolsa número 4
F-2L	Muestra lavada en frasco número 2
MI-8	Muestra labrada in situ número 8
TS-12	Tubo Shelby número 12
TD-9	Tubo Dennison número 9
TP-11	Tubo Pitcher número 11
TPL-7	Tubo pistón libre número 7
TR-5	Tubo rotatorio dentado número 5
NXL-6	Muestra de roca tomada con barril N serie L numero 6
Rec 45/75	45 cm., de recuperación en 75 cm., muestreados
50/10	50 golpes en 10 cm., en el SPT
EW, AW, BW, NW	Barras de perforación
NW, HW	Ademes
BXL, NXL	Barriles muestreadores serie L
PA	Perdida de agua o lodo de perforación

Nota: Adaptada de *Manual de Diseño de Obras Civiles: Capítulo B.2.1 Caracterización de los depósitos de suelo*, por E. Ovando Shelley, M. del C. Cabrera Velásquez, M. G. Olín Montiel, N. del P. Parra Piedrahita, 2008, Instituto de Ingeniería UNAM, CFE. (p. 42).

3.1.2.2 Ensayes de Laboratorio

En la Ciudad de México, es común que en los laboratorios en los que se determinan las características de las muestras se utilice la Clasificación de Suelos S.U.C.S; las cuales se obtienen a través de la ejecución de ensayes basados en la normatividad mostrada en la tabla 3.

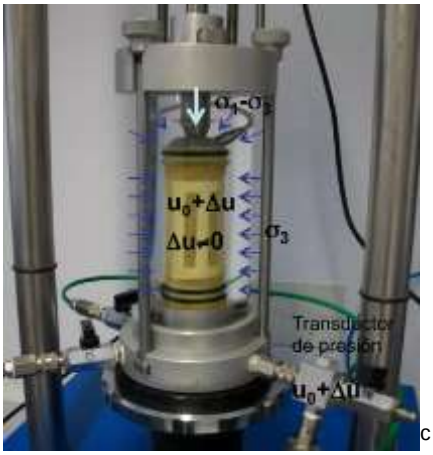
Tabla 3. *Ensayes de laboratorio: pruebas índices*

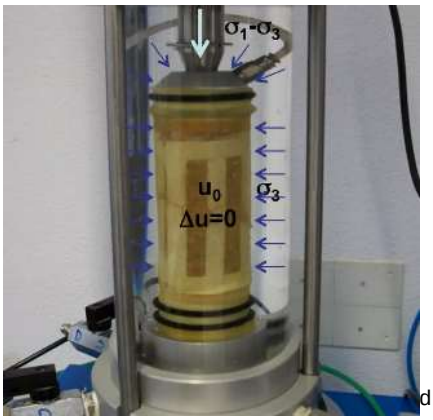
Característica	Normativa aplicada	Ilustración
Granulometría	NMX-C-496-ONNCCE-2014 (Industria de la Construcción – Geotecnia – Materiales para terracerías – Determinación de la composición granular)	a
Límites de consistencia.	NMX-C-493-ONNCCE-2018 (Industria de la Construcción - Geotecnia - Límites de Consistencia de Suelos - Método de Ensayo)	b
Peso volumétrico	ASTM. (2021). D7263 (Standard test methods for laboratory determination of density and unit weight of soil specimens)	c
Densidad de sólidos.	ASTM. (2017). D854 (Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycometer)	d
Contenido de agua	NMX-C-475-ONNCCE-2020 (Industria de la construcción – Geotecnia – Materiales térreos – Determinación del contenido de agua mediante horno – Método de ensayo)	e

Nota: [a] (Carbotecnia, 2024), [b] (Geotecnia-sor, 2010), [c] (Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, s.f), [d] (Facultad de Ingeniería BUAP, 2022), [e] (Portal Frutícola, 2018).

En las muestras inalteradas se realizan los ensayes mecánicos de la tabla 4.

Tabla 4. *Ensayes de laboratorio: pruebas mecánicas*

Característica	Normativa aplicada	Ilustración
Corte Directo.	ASTM. (2016). D5607 (Standard test methods for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force. ASTM D3080, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions)	a
Compresión Triaxial tipo UU.	NMX-C-432-ONNCCE-2002 (Industria de la construcción-geotecnia-cimentaciones-ensaye de compresion triaxial-método de prueba)	b
Compresión Triaxial tipo CU.	NMX-C-432-ONNCCE-2002 (Industria de la construcción-geotecnia-cimentaciones-ensaye de compresion triaxial-método de prueba)	 c

Característica	Normativa aplicada	Ilustración
Compresión triaxial CD	NMX-C-432-ONNCCE-2002 (Industria de la construcción-geotecnia-cimentaciones-ensaye de compresion triaxial-método de prueba)	 d
Consolidación	N·PRY·CAR·4·03·002 (Ejecución de Proyectos de Sistemas de Subdrenaje, que realice la Secretaría con recursos propios o mediante un Contratista de Servicios)	e

Nota: [a] (Universidad Nacional de Ingeniería de Lima Perú, 2023), [b,e] (UTEST, s.f.), [c,d] (Facultad de Alicante, 2022).

3.1.2.3 Zonificación Geotécnica.

El subsuelo de la Ciudad de México se divide en tres zonas, las cuáles se pueden observan en la figura 4.

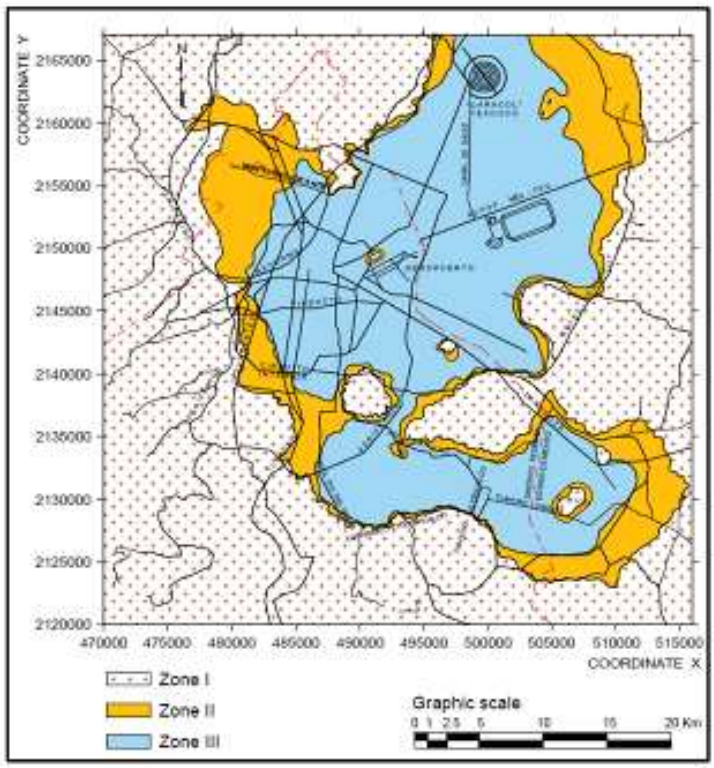
De acuerdo con el artículo 170 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, cada zona del subsuelo de la Ciudad de México tiene las siguientes características generales:

1. *Zona I:* Lomas, constituidas por rocas o suelos que suelen ser firmes y que se depositaron fuera del entorno lacustre. Sin embargo, en estos pueden encontrarse superficialmente o intercalados, depósitos de arena en estado suelto o suelos cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es común encontrar

oquedades en las rocas, así como cavernas y túneles excavados en el suelo para la explotación de minas de arena.

2. *Zona II:* Transición, en esta área, los depósitos profundos se hallan a 20 metros de profundidad o menos, y están formados principalmente por estratos y limo arenosos, intercalados con capas de arcilla lacustre; el grosor de estas capas varía entre decenas de centímetros y unos pocos metros.
3. *Zona III:* Lacustre, Compuesta por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con diversos contenidos de limo o arcilla. Estas capas arenosas tienen una consistencia de firme a muy dura y espesores que varían desde centímetros hasta varios metros. Los depósitos lacustres generalmente están cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede superar los 50 metros.

Figura 4. *El subsuelo de la Ciudad de México.*



Nota: Adaptado de *El subsuelo de la Ciudad de México*, por G. Auvinet, E. Méndez, M. Juárez, 2016, Instituto de ingeniería UNAM, (Vol. III, p. 144).

3.1.3 Determinación de las Propiedades del Suelo en el Laboratorio

En esta fase, se llevan a cabo levantamientos geológicos adicionales y estudios de mecánica de suelos y rocas cuando es necesario. En ocasiones, estos trabajos sirven para confirmar la investigación preliminar.

Es necesario la recolección de información, esto para poder realizar las siguientes actividades:

- *Evaluar la capacidad de carga:* Determinar la capacidad del suelo para soportar cargas estructurales sin fallar o deformarse excesivamente.
- *Identificar riesgos geotécnicos:* Detectar posibles problemas como la erosión, subsidencia, expansión del suelo, consolidación y fenómenos de inestabilidad que podrían afectar la seguridad de las edificaciones.
- *Proporcionar datos para el diseño de cimentaciones:* Obtener información sobre las condiciones del suelo para diseñar cimentaciones adecuadas que distribuyan las cargas de manera uniforme y eviten asentamientos excesivos o fallas estructurales.

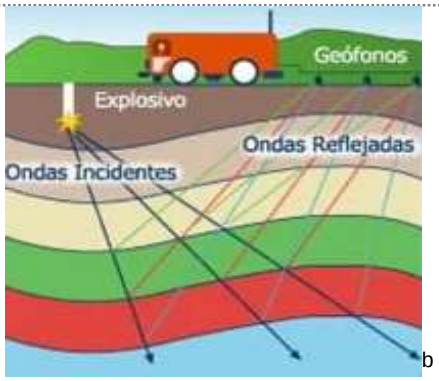
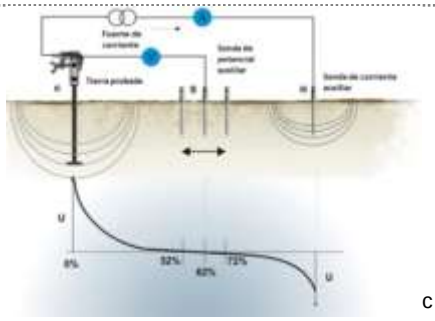
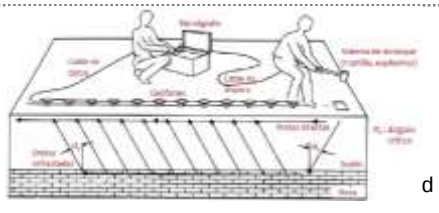
3.1.3.1 Métodos de Exploración.

El estudio del área, realizado a través de exploraciones de campo y ensayos de laboratorio, debe ser lo suficientemente exhaustivo como para determinar con precisión las condiciones geotécnicas locales. Este análisis permitirá desarrollar un modelo geotécnico confiable, que se utilizará en el diseño y evaluación de cimentaciones, cortes, excavaciones, tratamientos y otros aspectos relacionados.

3.1.3.1.1 Métodos Indirectos.

Incorporan información publicada por entes oficiales en informes especializados, mapas, planos, fotografías aéreas y otros recursos. Además, se emplean métodos geofísicos para determinar las propiedades eléctricas, sísmicas, magnetométricas y otras características de los materiales en el sitio. A continuación, se mostrarán las más comunes, en la tabla 5

Tabla 5. *Métodos indirectos*

Método	Normativa aplicada	Ilustración
Fotogeología (levantamientos geológicos superficiales)	N-PRY-CAR-10-03-001/00 (Proyecto – Carreteras – Estudios Geológicos - Ejecución de Estudios Geológicos) N-PRY-CAR-10-03-002/00: (Proyecto – Carreteras – Estudios Geológicos - Fotogeología y Levantamientos Geológicos)	a
Métodos geofísicos (sísmico, eléctrico, electromagnético y gravimétrico)	N-PRY-CAR-01-02-004/19 (Proyecto – Carreteras – Estudios – Estudios Geotécnicos – Exploración Indirecta del Subsuelo)	 b
Métodos eléctricos (método de resistividad y método de caídas de potencial)	NMX-J-212-ANCE-2017 (Conductores-Resistencia, resistividad y conductividad eléctricas-Método de prueba)	 c
Geosísmico (reflexión y refracción)	N-PRY-CAR-01-02-004/19 (Proyecto – Carreteras – Estudios – Estudios Geotécnicos – Exploración Indirecta del Subsuelo)	 d

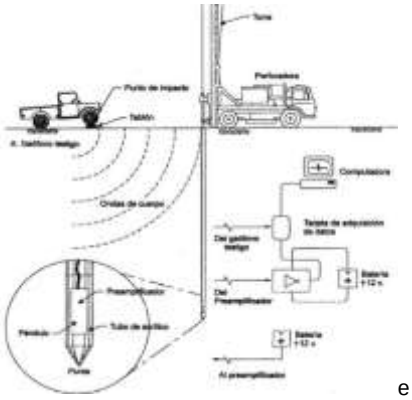
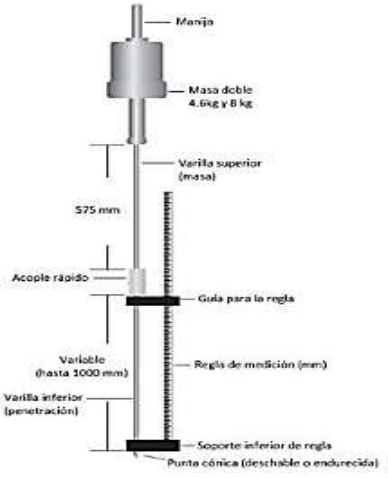
Nota: [a] (MILES, 2022), [b] (Universidad Privada del Norte, 2016), [c] (Domanski, s.f.), [d] (ResearchGate, s.f.).

3.1.3.1.2 Métodos Directos.

Los métodos directos de exploración permiten identificar las condiciones geológicas y geotécnicas del área de estudio observando in situ las características de suelos y rocas, complementado con la recolección de muestras. Algunos de los más comunes, con la respectiva normativa que la rige, se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. *Métodos directos*

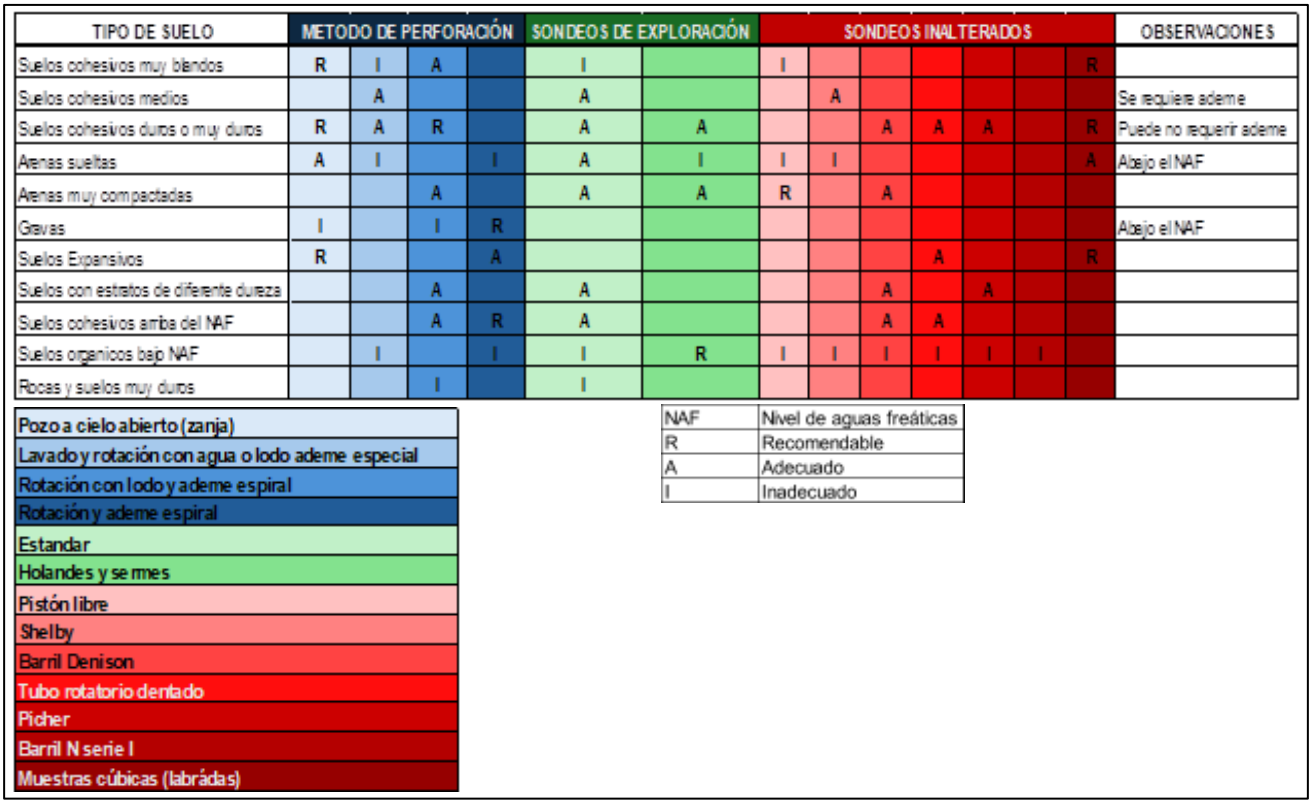
Método	Normativa aplicada	Ilustración
Pozos a cielo abierto.	NMX-C-430-ONNCCE-2002 (Industria de la construcción – Geotecnia – Cimentaciones – Sondeos de pozo a cielo abierto)	a
Perforación con pala posteadora y barrenas helicoidales	PROY-NMX-C-431-ONNCCE-2021 (Industria de la construcción – Geotecnia - Toma de muestra alterada e inalterada - Métodos de muestreo)	b
Sondeos de penetración estándar	PROY-NMX-C-431-ONNCCE-2021 (Industria de la construcción – Geotecnia - Toma de muestra alterada e inalterada - Métodos de muestreo)	c

Método	Normativa aplicada	Ilustración
Muestreo inalterado con tubo shelby	PROY-NMX-C-431-ONNCCE-2021 (Industria de la construcción – Geotecnia - Toma de muestra alterada e inalterada - Métodos de muestreo)	d
Sondeos de cono eléctrico	PROY-NMX-C-431-ONNCCE-2021 (Industria de la construcción – Geotecnia - Toma de muestra alterada e inalterada - Métodos de muestreo)	 e
Sondeos de cono dinámico	PROY-NMX-C-431-ONNCCE-2021 (Industria de la construcción – Geotecnia - Toma de muestra alterada e inalterada - Métodos de muestreo)	 f

Nota: [a] (OBRYC, 2016), [b] (Condori, 2017), [c] (CONSTRUNEIC, 2023), [d] (Geotecnia Estructural, 2024), [e] (Sísmica de suelos, s.f.), [f] (Ulalte, s.f.).

La figura 5 presenta un resumen de los métodos de perforación y muestreo que son adecuados para suelos ubicados tanto por encima como por debajo del nivel freático, clasificados según su aplicabilidad en diversas condiciones.

Figura 5. *Criterio de selección de métodos de perforación, exploración y muestreo*



TIPO DE SUELO	METODO DE PERFORACIÓN				SONDEOS DE EXPLORACIÓN		SONDEOS INALTERADOS							OBSERVACIONES
Suelos cohesivos muy blandos	R	I	A		I		I						R	
Suelos cohesivos medios		A			A			A						Se requiere ademe
Suelos cohesivos duros o muy duros	R	A	R		A	A			A	A	A		R	Puede no requerir ademe
Arenas sueltas	A	I		I	A	I	I	I					A	Abajo el NAF
Arenas muy compactadas			A		A	A	R		A					
Gravas	I		I	R										Abajo el NAF
Suelos Expansivos	R			A						A			R	
Suelos con estratos de diferente dureza			A		A				A		A			
Suelos cohesivos arriba del NAF			A	R	A				A	A				
Suelos organicos bajo NAF		I		I	I	R	I	I	I	I	I	I		
Rocas y suelos muy duros			I		I									

Pozo a cielo abierto (zanja)
Lavado y rotación con agua o lodo ademe especial
Rotación con lodo y ademe espiral
Rotación y ademe espiral
Estandar
Holandes y sermes
Pistón libre
Shelby
Barril Denison
Tubo rotatorio dentado
Picher
Barril N serie I
Muestras cúbicas (labradas)

NAF	Nivel de aguas freáticas
R	Recomendable
A	Adecuado
I	Inadecuado

Nota: Adaptado de *Manual de Diseño de Obras Civiles: Capítulo B.2.1 Caracterización de los depósitos de suelo*, por E. Ovando Shelley, M. del C. Cabrera Velásquez, M. G. Olín Montiel, N. del P. Parra Piedrahita, 2008, Instituto de Ingeniería UNAM, CFE. (p. 47).

3.1.3.2 Requisitos Mínimos de Exploración.

Las exploraciones mínimas corresponderán directamente a dos factores, de acuerdo con el Reglamento de Construcción; esto es dependiendo del “tipo de construcción”, y al “tipo de zona” en el que el proyecto será realizado, para construcción. Es necesario reconocer que estos “requisitos mínimos”, son solo los necesarios que solicita el Gobierno de la Ciudad de México, sin embargo, el Director Responsable de Obra, el Corresponsable de Seguridad Estructural y el Especialista en Ingeniería Geotécnica, deberán ser lo

suficientemente capaces para determinar las pruebas extras necesarias para la correcta ejecución del proyecto.

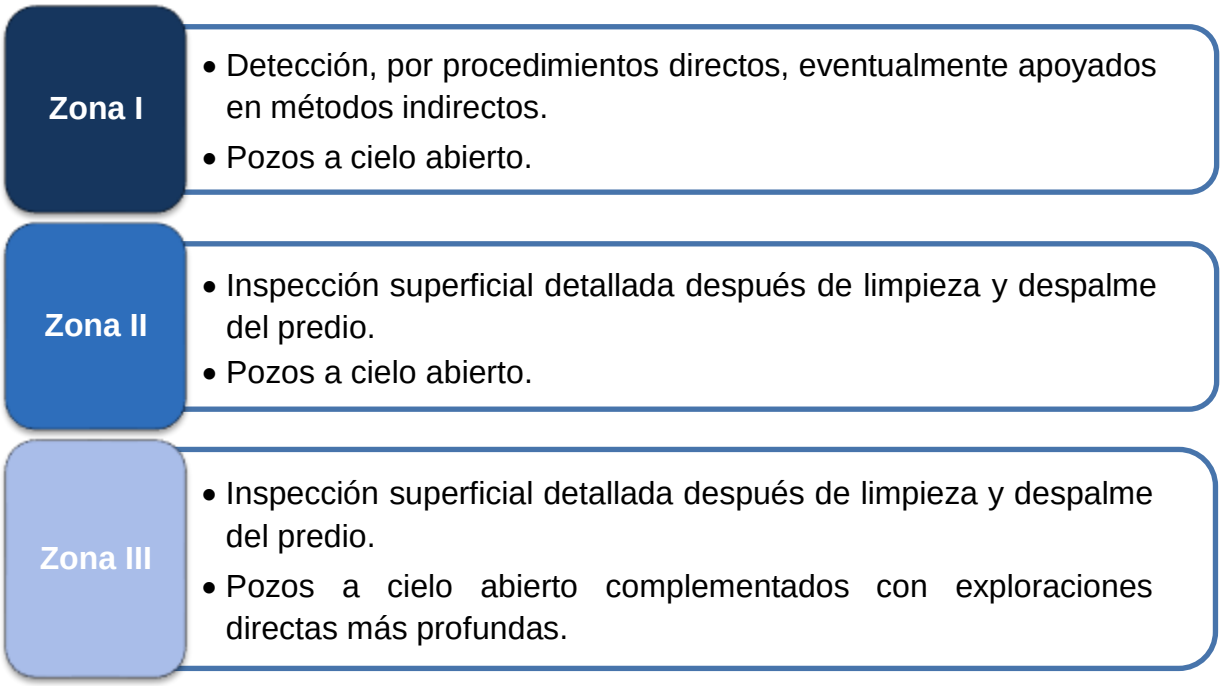
3.1.3.2.1 Construcciones Ligeras o Medianas de Poca Extensión y con Excavaciones Someras.

a) Peso unitario medio de la estructura w ≤ 4 t/m2

b) Perímetro de la construcción P ≤ 80 m (Zona I y II) ó P ≤ 120 m (Zona III)

c) Profundidad de desplante Df ≤ 2.5 m

Figura 6. *Requisitos mínimos de exploración en construcciones ligeras o medianas*



Nota: Requisitos mínimos de exploración, construcciones ligeras o medianas [Esquema], Norma técnica complementaria para diseño y construcción de cimentaciones. (2023). Norma técnica complementaria para diseño y construcción de cimentaciones. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf

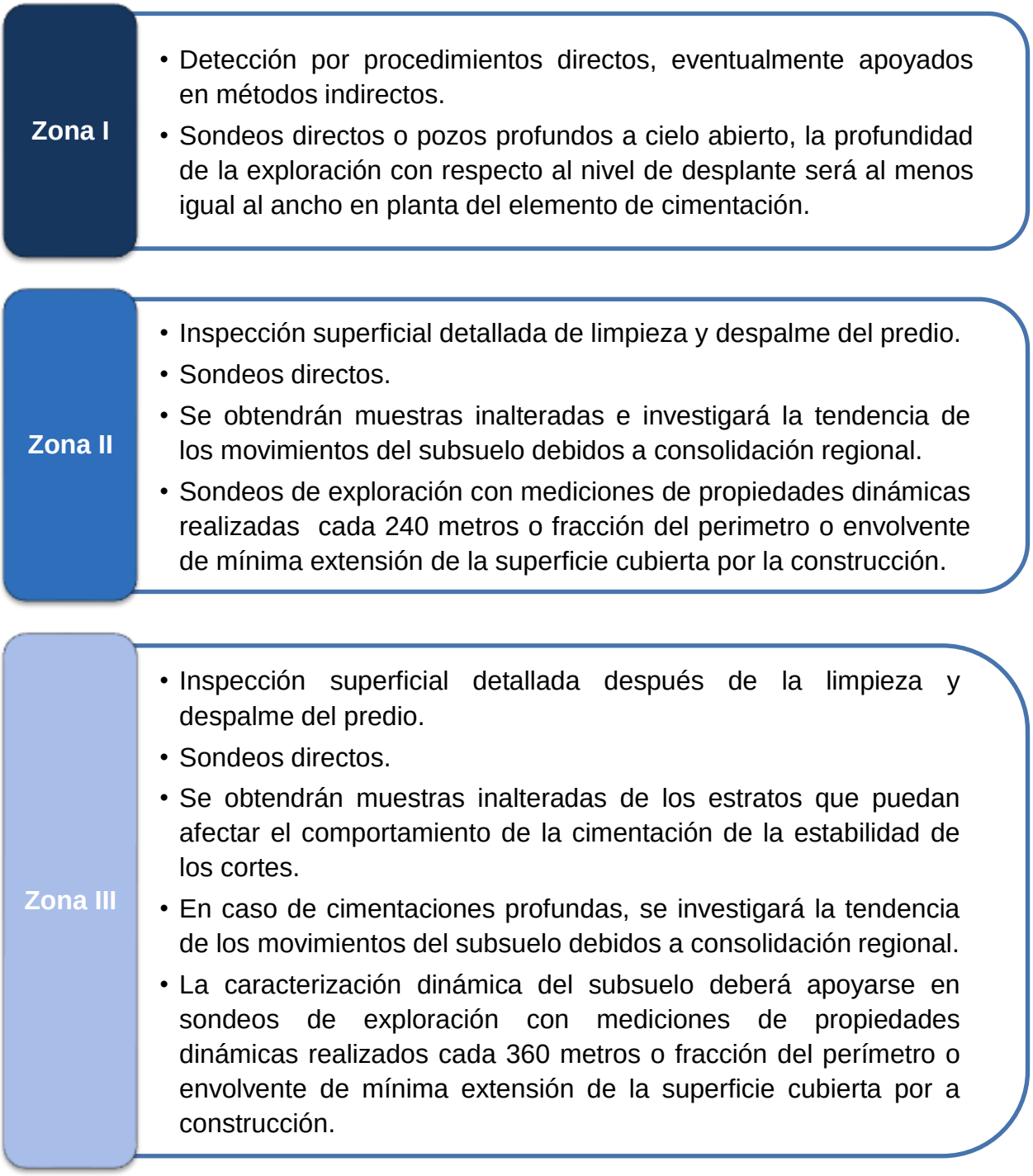
3.1.3.2.2 Construcciones Pesadas, Extensas o con Excavaciones Profundas.

a) Peso unitario medio de la estructura w > 4 t/m^2

b) Perímetro de la construcción P > 80 m (Zona I y II) o P > 120 m (Zona III)

c) Profundidad de desplante Df > 2.5

Figura 7. *Requisitos mínimos de exploración en construcciones pesadas o extensas*



Nota: Requisitos mínimos de exploración, construcciones pesadas o extensas [Esquema], Norma técnica complementaria para diseño y construcción de cimentaciones. (2023). Norma técnica complementaria para diseño y construcción de cimentaciones. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf

3.1.3.2.3 Requisitos Específicos para la Ciudad de México en Caso de Falla Geológica.

La correcta ejecución de los métodos de exploración revelará información esencial para realizar los cálculos pertinentes, ya sea para el mejoramiento de suelos o para el diseño de cimentaciones, respetando la normativa vigente y aplicable al lugar. Además, dicha información será fundamental para tomar otras medidas, como las indicadas en el "Reglamento de Impacto Ambiental y Riesgo".

Este reglamento, en su artículo 6, estipula que aquellas obras situadas en predios sobre una falla geológica, o a menos de 150 metros de ella, requerirán obtener la autorización en materia de impacto ambiental de la Secretaría del Medio Ambiente. El incumplimiento de este reglamento, debido a la falta de recopilación de información suficiente o a la ignorancia de estos protocolos, será motivo suficiente para someter el proyecto y a los responsables a las sanciones pertinentes establecidas en el mismo Reglamento.

3.1.4 Interpretación y Análisis

El Gobierno de la Ciudad de México establece que todo estudio o diseño geotécnico debe ser documentado en un informe geotécnico comprensivo, el cual debe incluir una memoria de diseño geotécnico detallada con información suficiente para garantizar una verificación clara y precisa.

3.1.4.1 Informe Geotécnico.

Por lo menos deberá presentar los siguientes temas:

1. Introducción
   - 1.1. Descripción general del proyecto
   - 1.2. Objetivo
   - 1.3. Ubicación y colindancias
   - 1.4. Descripción general del predio en estudio
   - 1.5. Características del proyecto

2. Condiciones geotécnicas del sitio
   2.1. Información geológica y geotécnica disponible
   2.2. Trabajos de campo realizados para la definición de las condiciones estratigráficas, anomalías, propiedades mecánicas y caracterización de condiciones de riesgo.
   2.3. Ensayes de laboratorio
   2.4. Interpretación estratigráfica y modelos geotécnicos para diseño
3. Análisis y diseño geotécnico de la cimentación
   3.1. Datos generales
   3.2. Solución de cimentación para cada una de las edificaciones
   3.3. Análisis de estabilidad
   3.4. Análisis de desplazamientos incluyendo asentamiento y/o emersión previsible de las estructuras
   3.5. Diseño de la excavación
   3.6. Recomendaciones para el diseño estructural
   3.7. Recomendaciones de pruebas de carga indicando sus características, proceso de ejecución y control, en caso dado.
4. Revisión, de acuerdo con la presente NTC-Cimentaciones, de los estados límite de falla y de servicio de cimentaciones, excavaciones y muros, en su caso.
5. Definición del procedimiento de construcción, incluyendo los requerimientos mínimos para garantizar el cumplimiento de las hipótesis de análisis y diseño aplicadas, así como la seguridad y el adecuado comportamiento futuro esperado de la obra en estudio y de las cimentaciones de los inmuebles colindantes.
6. Especificación del seguimiento requerido durante la construcción y vida útil de la construcción, incluyendo los procesos de control durante la construcción de las cimentaciones. Presentación, de un proyecto de instrumentación y/o monitoreo geotécnico a corto y largo plazo, indicando objetivos, alcances y características

generales de equipos y procesos de observación, interpretación y valores límite de las variables monitoreadas.

7. Conclusiones y recomendaciones, indicando las características generales de la cimentación, así como las recomendaciones particulares sobre la solución de cimentación, pruebas de carga, proceso constructivo, objetivos de la supervisión geotécnica y pasos a seguir en caso de modificaciones del proyecto.
8. Referencias

Anexo 1. Informe fotográfico

Anexo 2. Sondeos de exploración, pruebas de campo e instrumentación geotécnica

Anexo 3. Resultados de ensayes de laboratorio

Anexo 4. Combinaciones de cargas proporcionadas por la ingeniería estructural

Anexo 5. Memoria de diseño.

3.1.4.2 Memoria de Diseño Geotécnico.

La memoria de diseño exige al menos los siguientes rubros:

- *Datos de entrada para el análisis y diseño:* Modelos geotécnicos empleados, condiciones del agua subterránea, geometría del proyecto, condiciones sísmicas, hundimiento regional, cargas incidentes a la cimentación para cada combinación de análisis, caracterización de las distintas condiciones de riesgo estudiadas, características de las colindancias y limitaciones particulares del proyecto.
- *Métodos de análisis:* Descripción de los métodos de análisis empleados para determinar los estados límite de falla y servicio para las condiciones de corto y largo plazo, así como de las hipótesis consideradas, incluyendo el análisis y el proceso constructivo de las excavaciones y sus soportes, de las cimentaciones y de los mejoramientos del terreno, en caso dado.
- *Resultados:* Los resultados de los métodos de análisis empleados deberán incluir el estado de esfuerzos y deformaciones en cada etapa de análisis para las condiciones de corto y largo plazo, así como las condiciones de estabilidad en

términos del potencial de desarrollo de zonas plásticas que generen mecanismos de fallas cinemáticamente admisibles o en términos de factores de seguridad.

- *Anexos.* Se anexarán los resultados de las exploraciones, sondeos, pruebas de laboratorio y de campo y otras determinaciones y análisis, las magnitudes de las acciones consideradas en el diseño y los cálculos realizados.

3.1.5 Mejoramiento de Suelos

Son procedimientos realizados en terrenos formados por suelos de características pobres y con propiedades mecánicas no aptas para cumplir con los requisitos de resistencia, deformación o estabilidad necesarios para dar soporte adecuado a una edificación.

3.1.5.1 Sustitución.

Es posible excavar el suelo indeseable y reemplazarlo con uno de mejores características. Si es necesario, el relleno (figura 8) puede hacerse con materiales ligeros para reducir la carga vertical o el empuje del suelo.

Se debe especificar el espesor del suelo a retirar, así como las características del material de reemplazo, incluyendo su granulometría y límites de consistencia.

Si se utilizan materiales de bancos externos, se debe contar con la autorización de la Administración para su explotación y el lugar de disposición del material retirado.

Figura 8. *Mejoramiento de suelo por sustitución*

Nota: Adaptada de *Mecánica de suelos aplicada* [Apuntes de clase], por J. G. Clavellina Miller, 24 de mayo de 2024, Facultad de Ingeniería UNAM.

3.1.5.2 Compactación Dinámica.

- *Descripción del método*: Se puede utilizar un método (figura 9) que consiste en levantar una masa hasta cierta altura y dejarla caer sobre la superficie del suelo, generando ondas que densifican el suelo a una profundidad específica.
- *Zonas de prueba:* Al comenzar los trabajos, se establecerán zonas de prueba para determinar los valores óptimos de las variables involucradas. La eficiencia de la compactación se evaluará mediante comparaciones de pruebas en el suelo, utilizando sondeos de penetración estándar, cono eléctrico, cono dinámico o ensayos geofísicos, antes y después del proceso de compactación.

Figura 9. *Mejoramiento de suelo por compactación dinámica*

Nota: Adaptada de *Mecánica de suelos aplicada* [Apuntes de clase], por J. G. Clavellina Miller, 24 de mayo de 2024, Facultad de Ingeniería UNAM.

3.1.5.3 Vibrocompactación.

Se puede utilizar el método de vibrocompactación (figura 10), que consiste en introducir un vibrador cilíndrico horizontal en el suelo con la ayuda de una grúa; si es necesario, se puede utilizar un chiflón de agua para facilitar la penetración del equipo. Alternativamente, se pueden formar columnas de grava en el suelo mediante perforaciones realizadas con un vibrador, y luego rellenar los huecos con grava, compactándola con el mismo vibrador. La eficiencia de la compactación entre las columnas de grava se evaluará comparando los resultados de pruebas en el suelo entre columnas antes y después del tratamiento, utilizando sondeos de penetración estándar o cono eléctrico.

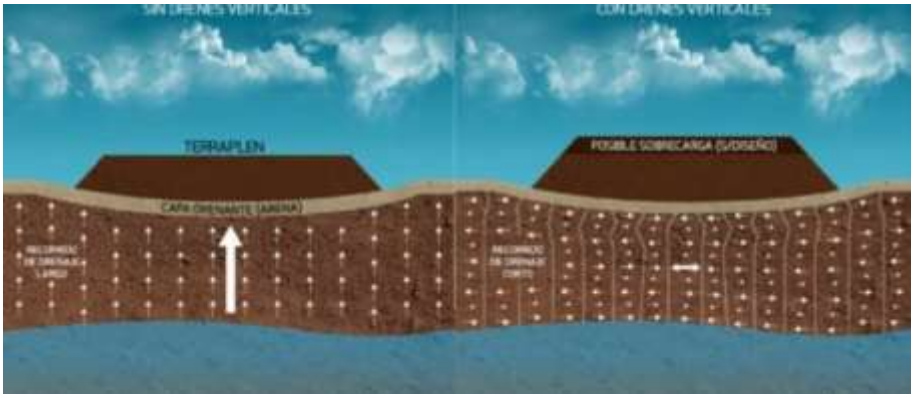
Figura 10. *Mejoramiento de suelo por vibrocompactación*

Nota: Adaptada de *Mecánica de suelos aplicada* [Apuntes de clase], por J. G. Clavellina Miller, 24 de mayo de 2024, Facultad de Ingeniería UNAM.

3.1.5.4 Precarga.

Se puede emplear una técnica que consiste en colocar una carga igual o mayor a la definitiva (figura 11) para reducir el tiempo necesario para alcanzar un asentamiento determinado bajo la carga de diseño. Una vez alcanzado el asentamiento, se retira la sobrecarga. Esta técnica puede utilizarse con o sin la ayuda de drenes de arena, prefabricados u otros, procurando que el proceso constructivo de los drenes evite o minimice el remoldeo del suelo circundante. Si se utiliza suelo o roca como precarga, el material debe provenir de bancos autorizados y, una vez retirado, debe ser dispuesto en sitios autorizados.

Figura 11. *Técnicas de mejoramiento "precarga"*



Nota: Adaptado de *Técnicas de mejoramientos de los suelos*: PARTE II , [Ilustración], por LinkedIn, (2023), LinkedIn, (https://www.linkedin.com/pulse/t%C3%A9cnicas-de-mejoramientos-los-suelos-parte-ii-egsciences)

Para verificar la eficiencia de la precarga, es necesario medir la evolución de los asentamientos en diferentes puntos y profundidades mediante bancos de nivel y placas de asentamiento, verificar la disipación de las presiones intersticiales durante el proceso y medir el aumento de la resistencia al corte no drenado del suelo al finalizar el tratamiento.

3.1.5.5 Congelación de Suelos.

Se puede utilizar este procedimiento para estabilizar temporalmente suelos saturados, pero no es aplicable en las Zonas II y III. Se realizarán mediciones periódicas de temperatura en el suelo y de la presión del sistema de refrigeración, y se protegerá el suelo circundante mediante un sistema de aislamiento.

El objetivo de este método es congelar la masa de suelo (figura 12) instalando una red de tuberías a través de las cuales circula salmuera o nitrógeno líquido. Esta técnica requiere que el suelo esté saturado y se utiliza en aplicaciones como tunelización, muros de contención y muros pantalla. La salmuera es más económica que el nitrógeno líquido, aunque este último produce resultados más rápidamente. Es importante señalar que, al congelarse, el agua se expande aproximadamente un 10%, lo que ha demostrado ser insatisfactorio en arcillas blandas como las del Valle de México.

Figura 12. *Congelación de suelos*

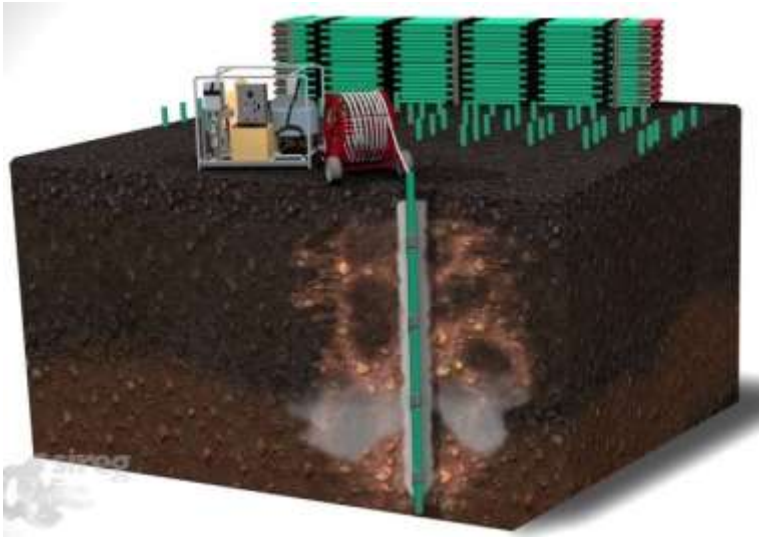
Nota: Adaptado de *Gases industriales Venezuela*, [fotografía], por Lindegas, (2024), Lindegas (http://www.linde-gas.com.ve/es/processes/freezing_and_cooling/ground_freezing/index.html)

3.1.5.6 Inyecciones.

Las inyecciones con cemento (figura 13), a gravedad o bajo presión, se usan para mejorar suelos granulares, rocas y cavidades. Se deben especificar el producto, dosificación, aditivos, y detalles de las perforaciones. También se establecerán criterios para la presión y control de volumen de inyección, y se tomarán muestras para ensayos. Se verificará que no haya movimientos ascendentes del suelo debido a la inyección.

La técnica de tubos de manguitos permite mayor presión y aplicaciones específicas, generando fracturamiento hidráulico en suelos cohesivos para formar inclusiones o mejorar características mecánicas.

Figura 13. *Método de mejoramiento por inyecciones*



Nota: Adaptado de *Mejoramiento de suelos por medio de inyecciones*, [Ilustración], por Construcciones UCE, (2019), Construcciones UCE (https://construccionesuce.wordpress.com/2019/08/27/mejoramiento-de-suelos-por-medio-de-inyecciones/)

3.1.6 Caso de estudio: Proyecto Mítikah.

Con la finalidad de complementar el tema de suelo, trabajos de campo y pruebas de laboratorio se abordará de manera general el caso del proyecto de desarrollo inmobiliario y de usos mixtos “Mítikah” desarrollado con una inversión de aproximadamente 20,000

millones de pesos. Se llegó a considerar como el proyecto más importante en bienes raíces de América Latina, se ubica en la Ciudad de México, en la Delegación Benito Juárez, en Av. Real de Mayorazgo No. 130, Colonia Xoco.

Originalmente, el proyecto constaba de la construcción de 7 edificios, véase figura 14; seccionándose en dos fases para su construcción. La Fase I comenzó en 2009, y la Fase II en 2011.

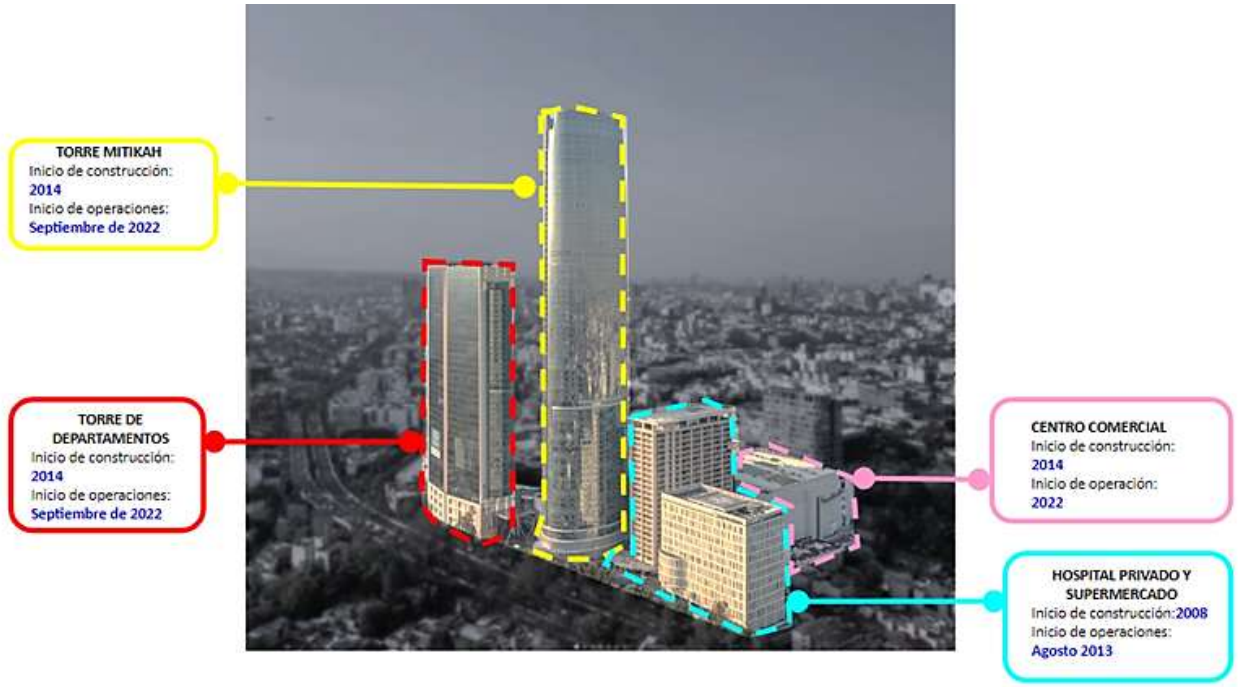
- Fase I:
    - Abarca la Torre Residencial, la Torre de Oficinas “M” ubicada sobre Churubusco, un centro comercial y un conjunto de consultorios, con una conclusión en 2019.
- Fase II:
    - Contempla área comercial y oficinas en el predio, con una conclusión en 2021.

Figura 14. *Modelo Proyecto Mítikah*

Nota: Adaptado de*: Mítikah Ciudad Viva Real Estate Market & Lifestyle,* [ilustración] por Real Estate Market & Lifestyle (2019).https://realestatemarket.com.mx/articulos/mercado-inmobiliario/usos-mixtos/21879-mitikah-ciudad-viva

Sin embargo, por cuestiones de impacto urbano el proyecto sufrió modificaciones quedando su construcción tal como se muestra en la figura 15.

Figura 15. *Proyecto Mítikah*



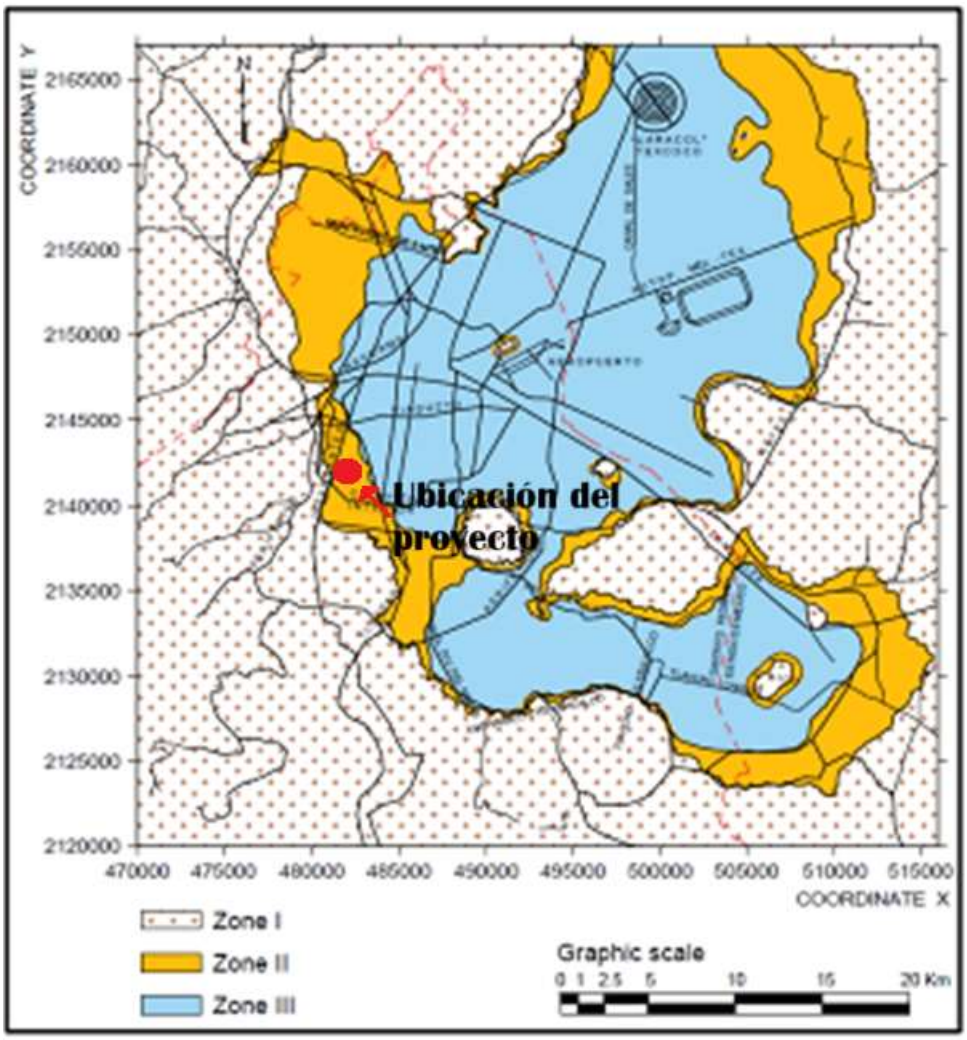
Nota: Adaptado de *Un polígono de actuación muy mítico*, [Ilustración], por Cárdenas D., Matamoros A., (2023), (https://diplomadosuelourbano.wordpress.com/2024/02/13/un-poligono-de-actuacion-muy-mitico/)

3.1.6.1 Ubicación geotécnica.

El Proyecto Mítikah se ubica en la zona Geotécnica de Transición, véase figura 16, denominada Zona II, la cual forma una franja entre los suelos lacustres y las sierras que rodean a la Ciudad de México, áreas aledañas y los aparatos volcánicos que sobresalen en la planicie de la zona de Lago.

Dada la ubicación del proyecto, que fue próxima a la “Zona de Lomas”, presentó irregularidades estratigráficas producto de los depósitos aluviales cruzados. Bajo la zona perimetral, se depositaron alternadamente estratos arcillosos con suelos gruesos de origen aluvial, también se encontraron interestratificaciones de arcillas y suelos limoarenosos además de mantos colgados.

Figura 16. *Ubicación de Proyecto Mítikah*



Nota: Adaptado de *El subsuelo de la Ciudad de México*,[ilustración] por G. Auvinet, E. Méndez, M. Juárez, 2016, Instituto de ingeniería UNAM, (Vol. III, p. 144).

3.1.6.2 Exploración geológica y geotécnica

La exploración geotécnica no fue la misma para cada fase del proyecto, sino que se realizaron estudios particulares para cada una de éstas. De acuerdo con Ramírez (2017) los métodos de exploración que se utilizaron incluyeron:

Para conocer las características de la Fase I

A) Características Estratigráficas del suelo; se obtuvieron realizando sondeos tipo mixto a 40 m, utilizando:

- Método de penetración estándar, para la obtención de pruebas representativas alteradas.
- Muestreadores tipo Shelby, obteniendo muestras inalteradas.

B) Para la Presión Hidráulica del Agua, con la ayuda de perforación previa, se utilizó:

- Piezómetro abierto tipo Casagrande, a 26 m de profundidad.

C) Nivel de Agua Freática, se obtuvo utilizando:

- Instalando un pozo de observación, a 8 m de profundidad.

Para conocer las características de la Fase II

A) Características Estratigráficas del suelo, se obtuvieron realizando cuatro sondeos tipo mixto a 45 m y 50 m (dos, respectivamente), utilizando:

- La combinación del procedimiento de penetración estándar, con el empleo de barril rotatorio NX.

Para el proyecto en general, la velocidad de propagación de las ondas cortantes se efectuó mediante pruebas Cross-Hole a cada metro.

3.1.6.3 Toma de decisión, proceso constructivo

La realización de estudios de mecánica de suelos, en conjunto a la Normativa vigente en ese momento, las Normas Técnicas Complementarias y reglamentos permitieron la definición de los procedimientos constructivos y de los elementos estructurales con las características requeridas para garantizar la estabilidad y seguridad durante la edificación. .

En relación a la toma de decisiones con base en la información recolectada, para este proyecto, se utilizaron diversos métodos de excavación y construcción de la cimentación para cada fase del proyecto.

- **Fase I:** Se realizó el diseño y procedimiento constructivo con Muro Milán en la zona perimetral del lugar, posteriormente, se procedió con la ejecución de la excavación a cielo abierto para después continuar con la colocación de anclas para el reforzamiento del suelo.

Figura 17. *Perforación para anclas*

Nota: Adaptada de *Procedimientos constructivos de la cimentación de Torre Mítika* [Tesis de licenciatura], (p. 73) por Ramírez A., 2017, Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000757378/3/0757378.pdf

- **Fase II**: Se optó por el método Top-Down, esto siendo decidido de acuerdo con solicitudes no directamente relacionadas al proceso constructivo si no a requerimientos del cliente.

Figura 18. *Logística de excavación en Top Down*

Nota: Adaptada de *Procedimientos constructivos de la cimentación de Torre Mítika* [Tesis de licenciatura], (p. 77) por Ramírez A., 2017, Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000757378/3/0757378.pdf

Conclusiones Capitulares

El conocimiento de las normativas, reglamentos y técnicas aplicables en el campo de la ingeniería civil es fundamental para la construcción de edificaciones. Estas normativas no solo asegurarán la estabilidad y seguridad estructural de las construcciones, sino que también mitigarán los riesgos asociados durante y después de la construcción.

La ignorancia de estos reglamentos y normativas no exime a los profesionales de las responsabilidades inherentes a su aplicación. El desconocimiento de las características geológicas y geotécnicas del suelo puede llevar a errores graves que ponen en peligro tanto la integridad de la edificación como la seguridad de sus ocupantes. Un ingeniero civil bien formado debe ser capaz de anticipar y gestionar adecuadamente estos riesgos para prevenir fallos estructurales y daños durante distintos eventos.

Un profundo conocimiento técnico y normativo fomenta prácticas de construcción más seguras y sostenibles, garantizando así la seguridad de las personas y la durabilidad de las estructuras en el tiempo. Para un egresado de ingeniería civil, la comprensión y aplicación de estos conocimientos no solo es una competencia técnica esencial, sino también una responsabilidad profesional que contribuye significativamente a la seguridad pública y a la calidad de vida de la comunidad.

Bibliografía

Ovando Shelley, E., Cabrera Velásquez, M. del C., Olín Montiel, M. G. y Parra Piedrahita, N del P. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles: Capítulo B.2.1 Caracterización de los depósitos de suelo*.Instituto de Ingeniería UNAM, CFE.

Das, B. M. (2001). *Principios de ingeniería de cimentaciones*. International Thomson Editores. (4ª ed.).

Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning. (4ª ed.)

Aguilar Tellez, M. A. (2012). Túnel Emisor Oriente: análisis, diseño y comportamiento. *Geotecnia,* (223), 22-32. https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/revista-geotecnia-smig-numero-223.pdf

Carbotecnia, (2024). *Granulometría o numero de malla* [Fotografía]. https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/granulometria-o-numero-de-malla/

Geotecnia-sor (25 de noviembre de 2010). *Apuntes de Geotecnia con Énfasis en Laderas: Consistencia del Suelo - Límites de Atterberg - Límite Plástico* [Fotografía]. Blogger. https://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_25.html

Facultad de Ingeniera Civil, Universidad Veracruzana. (s.f.). *Peso volumétrico del material* [Archivo PDF]. Disponible en https://www.uv.mx/pozarica/ingenieriacivil/files/2022/02/6_Peso-Volume%CC%81trico-del-Material.pdf

DDCFI13. [Canal Facultad Ingeniería BUAP] (14 de febrero de 2022). *Densidad relativa de los sólidos del suelo* [Archivo de Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=EvOYPV4Wnns

Portal Frutícola. (2018). *Métodos de medición de humedad del suelo: del campo al laboratorio* [Ilustración]. https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/08/30/metodos-de-medicion-de-humedad-del-suelo-del-campo-al-laboratorio/

Santos Jiménez, M. E. (2020). Análisis geotécnico con interacción estática y dinámica suelo-estructura de una cimentación compensada para un edificio ubicado en zona de lago de la CDMX (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

NORMA TÉCNICA COMPLEMENTARIA PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES. (2023). Norma técnica complementaria para diseño y construcción de cimentaciones. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf

Comisión Nacional del Agua. (2012). Manual de mecánica de suelos: Instrumentación y monitoreo del comportamiento de obras hidráulicas. https://www.cmic.org.mx/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica/Normas/Manualdemecanica2012.pdf

Organización Nacional de Normalización y Certificación de Calidad en Construcción y Equipos. (22 de febrero, 2024). Catálogo de normas mexicanas ONNCCE,. NMX - C – ONNCCE. https://onncce.org.mx/images/CatalogoNormas/CDN-56.pdf

Auvinet, G., Rodríguez J., Juárez M. (2017). Manual de diseño de obras civiles: Capítulo B.2.5, Cimentaciones en suelos, sección B: Geotecnia, tema 2: Mecánica de suelo. https://es.scribd.com/document/546945633/CFE-Manual-de-Diseno-de-Obras-Civil-Gabriel-Auvinet-Guichard

Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2018). Reglamento de impacto ambiental y riesgo. Última reforma publicada en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el 29 de octubre de 2018. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/index.php/leyes/reglamentos/360-reglamentodeimpactoambientalyriesgo

Ramírez Aguirre, A. (2017). *Procedimientos constructivos de la cimentación del proyecto Mítikah* (Tesina de especialización). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.

Cárdenas, D. Matamoros Vences A. (2023). *Un polígono de actuación muy mítico.* Blogger. https://diplomadosuelourbano.wordpress.com/2024/02/13/un-poligono-de-actuacion-muy-mitico/

Instituto de Ingeniería, UNAM. (2020). *Actualización de la zonificación sísmica de la Ciudad de México y áreas aledañas - Parte Norte: Capítulo 2.4* (Informe técnico). Gobierno de la Ciudad de México, Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México.

Tabla 3. Ensayes de laboratorio, pruebas mecánicas.

1 Ensayo de corte directo, (P.08) [fotografía], por Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú, julio 2023, (https://es.slideshare.net/slideshow/ensayo-corte-directo-2-1pptx/259397644)

2 Sistemas para Ensayos Triaxiales UU, [fotografía], por UTEST, s.f, UTEST (https://www.utest.com.tr/es/25752/Sistemas-para-Ensayos-Triaxiales-UUl)

3 Ensayo Triaxial (CU), (P.12) [fotografía], por Facultad de alicante, junio 2022, (https://es.slideshare.net/slideshow/tema14triaxial-cupdf/251948990#12)

4 Ensayo Triaxial (CD), (P.15) [fotografía], por Facultad de alicante, octubre 2022, (https://es.slideshare.net/slideshow/tema13triaxial-cdpdf/253861700#15)

5 consolidación, [fotografía], por UTEST, s.f, UTEST (https://www.utest.com.tr/es/25748/Consolidaci-n)

Tabla 3.1.5. Métodos Indirectos.

1¿Qué es la Fotogrametría con Drones y cómo se realiza?, [Ilustración], por UMILES, noviembre 2022,,UMILESgroup (https://umilesgroup.com/fotogrametria-con-drones/)

2 Métodos de estudio del interior de la tierra, (P.31), [Ilustración], por Universidad privada del norte, enero 2016, slideshare (https://www.utest.com.tr/es/25752/Sistemas-para-Ensayos-Triaxiales-UUl)

3 Medición de resistencia a tierra – caída de potencial, método con pinzas, [Ilustración], por R. Domanski, s.f, (https://www.sonel.pl/es/centro-de-conocimiento/articulos/telurometros/medicion-de-resistencia-a-tierra-caida-de-potencial-metodo-con-pinzas/)

4 Esquema de adquisición del método de refracción sísmica.) [Ilustración], por ResearchGate, s.f, ResearchGate, (https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Esquema-de-adquisicion-del-metodo-de-refraccion-sismica-Fuente-Arias-et-al_fig1_355726975)

Tabla 3.1.6 Métodos Directos.

1 Geotecnia y espesores: Pozo a cielo abierto, [fotografía], por OBRYC, enero 2016, Plataforma X (https://x.com/obrycmx/status/692800479118491648)

2 Calicata con posteadora, [fotografía], por E. Condori, septiembre 2017, Plataforma X (https://x.com/ErinsonSaenzCP/status/913599960897265664)

3 Ensayo de Penetración Estándar (SPT) en Ingeniería Civil: Claves y Aplicaciones, [fotografía], por CONSTRUNEIC, noviembre 2023, CONSTRUNEIC, (https://construneic.com/mecanica-de-suelos/ensayo-de-penetracion-estandar-spt/#google_vignette)

4 Muestras inalteradas - Tubo Shelby Dentado a diferentes profundidades para construcción de Edificio, [fotografía], por Geotecnia Estructural, 2024, YouTube (https://www.youtube.com/watch?v=7To8isFk0AU)

5 Sondeo de Cono Eléctrico (CPTU), [Ilustración], por sísmica de suelos, s.f, Sísmica (https://sismica.com.mx/procedimientos/sondeo-cono-electrico-cptu.php)

6¿Qué es y cómo se utiliza el Cono de Penetración Dinámico?, [Ilustración], por A. Ulalte, s.f, Bloglanammeucr (https://bloglanammeucr.wordpress.com/2020/07/06/que-es-y-como-se-utiliza-el-cono-de-penetracion-dinamico/#:~:text=El%20Cono%20de%20Penetraci%C3%B3n%20Din%C3%A1mico%20(DCP%20por%20sus%20siglas%20en,bases%20y%20subbases)%20no%20estabilizados)

Índice de Figuras

Figura 1. *Exploración del entorno con dron* 5

Figura 2. *Exploración geotécnica*.....7

Figura 3. *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.)*.....8

Figura 4. *El subsuelo de la Ciudad de México.* 14

Figura 5. *Criterio de selección de métodos de perforación, exploración y muestreo*.....19

Figura 6. *Requisitos mínimos de exploración en construcciones ligeras o medianas* ...20

Figura 7. *Requisitos mínimos de exploración en construcciones pesadas o extensas*..21

Figura 8. *Mejoramiento de suelo por sustitución* 25

Figura 9. *Mejoramiento de suelo por compactación dinámica*.....26

Figura 10. *Mejoramiento de suelo por vibrocompactación* 27

Figura 11. *Técnicas de mejoramiento "precarga"* 27

Figura 12. *Congelación de suelos* 28

Figura 13. *Método de mejoramiento por inyecciones* 29

Figura 14. *Modelo Proyecto Mítikah* 30

Figura 15. *Proyecto Mítika*…….……31

Figura 16. *Ubicación del Proyecto Mítika*……32

Figura 17. *Perforación para anclas*……..……34

Figura 18. *Logística de excavación en Top Down.*.……34

Índice de Tablas

Tabla 1. *Información por consultar durante los estudios preliminares* 3

Tabla 2. *Abreviaturas complementarias para formular los registros de campo* 9

Tabla 3. *Ensayes de laboratorio: pruebas índices* 11

Tabla 4. *Ensayes de laboratorio: pruebas mecánicas* 12

Tabla 5. *Métodos indirectos* 16

Tabla 6. *Métodos directos* 17

Este trabajo fue desarrollado por académicos y alumnado adscrito al Departamento de Construcción de la División de Ingenierías Civil y Geomática con recursos del Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (PAPIME PE101724).

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Facultad de Ingeniería (FI)

Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA)