



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE RESPUESTA TÉRMICA (TRT)
PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS SUELOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ABIGAIL MARISOL RIVERA MARTÍNEZ

TUTORA PRINCIPAL
DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, CDMX, JULIO 2021.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Rigoberto Rivera Constantino

Secretario: Dr. David Morillón Gálvez

Vocal: Dra. Norma Patricia López Acosta

1^{er.} Suplente: Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez

2^{d o.} Suplente: M. en I. Walter Iván Paniagua Zavala

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTORA DE TESIS:

DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por tanto.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial al Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería por permitirme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

A la Dra. Norma Patricia López Acosta por aceptarme en su grupo de trabajo y brindarme la confianza para la realización de este proyecto.

A los sinodales Dr. Rigoberto Rivera Constantino, Dr. David Morillón Gálvez, Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez, M. en I. Walter Iván Paniagua Zavala por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

Al Instituto de Ingeniería por el espacio de trabajo y la beca otorgada para la culminación de esta tesis.

A la empresa de ingeniería Pilotec por su valioso apoyo para realizar las pruebas de respuesta térmica.

A la empresa LBR&A Arquitectos por el apoyo para la realización de la prueba de respuesta térmica *in situ* en la primera pila de energía en México.

A la empresa de ingeniería InGeum por su valioso apoyo en campo.

A la empresa de ingeniería Delta Cimentaciones por el apoyo y el espacio brindado para realización de la prueba de respuesta térmica.

Al M. en I. David Francisco Barba Galdámez por su paciencia, apoyo, consejos y asesoría para la realización de este proyecto.

A la Ing. Nayeli Rivera Martínez y al Ing. Jorge Torres Velázquez por su asesoría y apoyo.

A Fernando Samperio por su valioso apoyo.

A los compañeros y amigos del Instituto de Ingeniería que me brindaron su apoyo de manera desinteresada para la puesta en marcha del equipo TRT-IIUNAM, Esteban Rangel, Hugo Alberto Hernández, Ángel Rivera, Eduardo Martínez, Josué López y Ricardo Solórzano.

DEDICATORIA

A mis padres Irma Martínez y Jaime Rivera por su gran amor y apoyo.

A mis hermanos Nayeli, Isaac y Eduardo, gracias por tantos
momentos compartidos.

ÍNDICE

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
NOTACIÓN.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1. Flujo de calor en suelos.....	5
2.1.1. Transferencia de calor en suelos.....	5
2.1.2. Propiedades térmicas de los suelos.....	6
2.1.3. Aplicaciones de los sistemas de calor geotérmico.....	7
2.2. Estimación de las propiedades térmicas del suelo en laboratorio y campo.....	9
2.3. Método de aguja térmica.....	11
2.3.1. Desarrollo de la prueba.....	12
2.3.2. Método de interpretación de la aguja térmica.....	13
2.4. Descripción de un ensayo de respuesta térmica (TRT).....	16
2.4.1. Antecedentes.....	16
2.4.2. Equipo.....	19
2.4.3. Montaje.....	21
2.4.4. Procedimiento de ensayo.....	22
2.4.5. Resistencia térmica del pozo de prueba.....	23
2.4.6. Variación de la temperatura del suelo.....	24
2.5. Teorías y modelos matemáticos para la evaluación de un ensayo TRT.....	25
2.5.1. Modelos analíticos.....	25
2.5.2. Modelos numéricos.....	32
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO TRT-IIUNAM.....	33
3.1. Descripción del equipo de respuesta térmica implementado (TRT-IIUNAM).....	33
3.2. Circuito interno de funcionamiento.....	35
3.2.1. Componentes hidráulicos.....	35
3.2.2. Dispositivos de trabajo.....	37
3.2.3. Dispositivos de medición.....	39
3.3. Sistema de adquisición de datos.....	43
3.4. Fuente de alimentación eléctrica.....	44
3.5. Control eléctrico.....	45
4. EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE RESPUESTA TÉRMICA EN MÉXICO CON EL EQUIPO TRT-IIUNAM.....	49
4.1. Consideraciones generales.....	49
4.2. Ensayo TRT en una de las primeras seis pilas de energía mexicanas.....	49
4.2.1. Localización.....	49
4.2.2. Estratigrafía.....	50
4.2.3. Etapas del ensayo TRT en una pila de energía.....	50
4.2.4. Determinación de las propiedades térmicas del suelo del sitio.....	54
4.3. Ensayo TRT en un pozo de prueba en el subsuelo.....	58
4.3.1. Localización.....	58
4.3.2. Geología.....	58
4.3.3. Temperatura ambiente media anual.....	59

4.3.4. Exploración geotécnica	60
4.3.5. Estratigrafía	63
4.3.6. Determinación de las propiedades índice	65
4.3.7. Propiedades térmicas obtenidas en laboratorio en muestras de suelo.....	68
4.3.8. Prueba TRT en un pozo de prueba en el subsuelo	69
5. CONCLUSIONES GENERALES	89
REFERENCIAS	91
ANEXOS	97
ANEXO A. Reporte fotográfico de la construcción y puesta en marcha del equipo de respuesta térmica (TRT-IIUNAM)	97
ANEXO B. Estudio de diferentes mezclas para uso como relleno en ensayos de respuesta térmica (TRT).....	102

RESUMEN

El diseño de estructuras termoactivas para el acondicionamiento de espacios requiere de una estimación precisa de las propiedades térmicas del suelo, como la conductividad térmica, la temperatura del suelo inalterado y la resistencia térmica del pozo intercambiador de calor. Estos parámetros se pueden medir *in situ* mediante una prueba de respuesta térmica (TRT). La prueba TRT consiste en inyectar calor a una tasa constante, a través de una tubería por la que circula un fluido portador de calor a cierta temperatura dentro de un circuito cerrado y se monitorea el cambio de temperatura a lo largo del tiempo durante varios días.

El principal objetivo de esta investigación fue el diseño, construcción, calibración y puesta en marcha de un equipo móvil de respuesta térmica (denominado TRT-IIUNAM) para llevar a cabo pruebas TRT en nuestro país. El buen funcionamiento del equipo TRT-IIUNAM implementado, se comprobó con la ejecución de dos pruebas TRT, una de ellas en la primera pila de energía construida en el país (ubicada al poniente de la CDMX) y la otra en un pozo de prueba en el subsuelo (ubicado al noreste del Estado de México). Con las pruebas realizadas fue posible caracterizar el comportamiento térmico de las formaciones arenosas de dos sitios diferentes. En el sitio donde la prueba TRT se ejecutó directamente en el subsuelo (al noreste del Estado de México), fue posible obtener muestras de suelo para su estudio en el laboratorio. Por lo que, en este caso se determinaron además de *in situ*, las propiedades térmicas en el laboratorio de seis muestras inalteradas por medio del método transitorio de la aguja térmica (con ayuda del equipo *KD2 Pro*). Adicionalmente, como parte de esta investigación, se caracterizó el suelo de interés mediante sus propiedades índice y la clasificación SUCS. De lo anterior, se determinó que las muestras ensayadas al noreste del Estado de México se caracterizan por tener valores bajos de densidad y por lo tanto bajas conductividades térmicas. Asimismo, se compararon las conductividades térmicas obtenidas con el sensor de agua simple (TR-1) y el sensor de aguja doble (SH-1) del equipo *KD2 Pro*, obteniéndose que la conductividad térmica no presenta variaciones significativas en función de la profundidad. Los resultados de las pruebas en campo y laboratorio fueron valiosos, pues permitieron identificar que las propiedades térmicas obtenidas en el laboratorio con el método de la aguja térmica (equipo *KD2 Pro*) son menores que las obtenidas en campo con la prueba TRT. Es decir, que el efecto de escala en las muestras de suelo, ocasiona que en los ensayos de laboratorio se subestime el valor real de las propiedades térmicas *in situ*. Además, en el sitio donde la prueba TRT se realizó en el subsuelo, se monitoreó la temperatura del suelo durante un periodo de tres meses dentro de un pozo de observación, registrándose que la temperatura ambiente tiene gran influencia en la variación de la temperatura del suelo.

Por otra parte, comparando las conductividades térmicas obtenidas en los dos sitios de estudio, las magnitudes medidas en el suelo ubicado al poniente de la CDMX resultaron más altas que las del sitio al noreste del Estado de México. Lo anterior, demuestra la importancia de estudiar cada sitio de interés con pruebas particulares. En adición, los resultados obtenidos de la prueba en una pila de energía (al poniente de la CDMX) fueron interpretados utilizando el procedimiento transitorio propuesto por Loveridge *et al.* (2013), y los resultados obtenidos de la prueba en campo en el subsuelo (al noreste del Estado de México) se analizaron con el modelo analítico de la fuente lineal propuesto por Ingersoll y Plass (1948). Estos métodos resultaron convenientes, ya que permitieron medir correctamente las propiedades térmicas de los suelos analizados.

Se prevé que el equipo TRT-IIUNAM será una herramienta útil que contribuirá a la caracterización de las propiedades térmicas de los suelos mexicanos.

ABSTRACT

The design of thermo-active structures for space conditioning requires an accurate estimation of the thermal properties of the soil, such as thermal conductivity, the temperature of the undisturbed soil and the thermal resistance of the heat exchanger borehole. These parameters can be measured *in situ* using a thermal response test (TRT). The TRT test consists of injecting heat at a constant rate, through a pipe through which a heat-carrying fluid circulates at a certain temperature within a closed circuit and the change in temperature is monitored over time for several days.

The main objective of this research was the design, construction, calibration and commissioning of a mobile thermal response equipment (called TRT-IIUNAM) to carry out TRT tests in our country. The good functioning of the TRT-IIUNAM equipment implemented was verified with the execution of two TRT tests, one of them in the first energy pile built in the country (located to the west of the CDMX) and the other in a test borehole in the subsoil (located northeast of the State of Mexico). With the tests carried out, it was possible to characterize the thermal behavior of the sandy formations from two different sites. At the site where the TRT test was run directly underground (northeast of the State of Mexico), it was possible to obtain soil samples for study in the laboratory. Therefore, in this case, in addition to *in-situ*, the thermal properties in the laboratory of six undisturbed soil samples were determined by means of the transient method of the thermal needle probe test (with the help of the *KD2 Pro* unit). In addition, as part of this research, the soil of interest was characterized by its index properties and the SUCS classification. In this case, it was determined that the samples tested in the northeast of the State of Mexico are characterized by low density values and therefore low thermal conductivities. In addition, the thermal conductivities obtained with the simple water sensor (TR-1) and the double needle sensor (SH-1) of the *KD2 Pro* unit were compared, obtaining that the thermal conductivity does not present significant variations depending on the depth. The results of the field and laboratory tests were valuable, since they allowed to identify that the thermal properties obtained in the laboratory with the thermal needle method (*KD2 Pro* equipment) are lower than those obtained in the field with the TRT test. In other words, the scale effect in soil samples causes the real value of *in-situ* thermal properties to be underestimated in laboratory tests. Also, at the site where the TRT test was carried out in the subsoil, the soil temperature was monitored during a period of three months inside an observation borehole, registering that the ambient temperature has a great influence on the variation of the soil temperature.

Moreover, comparing the thermal conductivities obtained in the two study sites, the magnitudes measured in the soil located to the west of the CDMX were higher than those of the site to the northeast of the State of Mexico. The above demonstrates the importance of studying each site of interest with particular tests. Furthermore, the results obtained from the test in an energy pile (west of CDMX) were interpreted using the transitory procedure proposed by Loveridge et al. (2013), and the results obtained from the field test in the subsoil (northeast of the State of Mexico) were analyzed with the analytical model of the linear source proposed by Ingersoll and Plass (1948). These methods were convenient, since they allowed to correctly measure the thermal properties of the analyzed soils.

The TRT-IIUNAM equipment is expected to be a useful tool that will contribute to the characterization of the thermal properties of Mexican soils.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmico (a) calefacción, (b) refrigeración. (ATECYR, 2012).	8
Figura 2.2. Instalación de tuberías de intercambio de calor en: a) pila y b) losa (Brandl, 2006; Villanueva-Peñalver y Gutiérrez-Fernández-Cuervo, 2019).	9
Figura 2.3. Comparación de los valores de conductividad térmica obtenidos en campo y laboratorio (adaptado de Vieira <i>et al.</i> , 2017).	10
Figura 2.4. a) Esquema de configuración de medición con el sensor de la aguja simple equipo KD2-PRO; b) Sensor de aguja simple TR-1.	12
Figura 2.5. a) Esquema de configuración de la medición con el sensor de la aguja doble, b) Sensor de aguja doble SH-1.	12
Figura 2.6. Gráficos obtenidos de la norma ASTM D5334-014: a) Pendiente S_h en la etapa de calentamiento, b) Pendiente S_c en la etapa de recuperación. ...	15
Figura 2.7. Primeros equipos de respuesta térmica.	17
Figura 2.8. Otros equipos TRT y ensayo de respuesta térmica.	18
Figura 2.9. Comparación esquemática entre: a) prueba de bombeo sin pozos de observación, b) ensayo de respuesta térmica de extracción de calor (adaptado de Banks, 2012).	19
Figura 2.10. Esquema de un equipo TRT estándar (adaptado de Kamarad, 2012).	20
Figura 2.11. Componentes de la resistencia térmica de un pozo intercambiador de calor (adaptado de Acuña, 2010).	23
Figura 2.12. Fluctuación de la temperatura inicial del suelo	25
Figura 2.13. Esquemas de los modelos clásicos de funciones G: a) Fuente lineal infinita, b) Modelo de fuente cilíndrica hueca infinita, c) Fuente lineal finita.	30
Figura 3.1. Diagrama de bloques del equipo TRT-IIUNAM.	33
Figura 3.2. Vista isométrica del equipo móvil TRT-IIUNAM 2021.	34
Figura 3.3. Vista en corte lateral trasera del equipo TRT-IIUNAM 2021.	34
Figura 3.4. Diagrama ilustrativo del funcionamiento interno del equipo TRT-IIUNAM implementado (IIUNAM, 2021).	35
Figura 3.5. Ubicación del tanque de almacenamiento y conexiones.	36
Figura 3.6. Sistema de funcionamiento del equipo TRT-IIUNAM con dirección de las líneas de flujo.	37
Figura 3.7. Representación gráfica de la temperatura en función de la resistencia.	40
Figura 3.8. Croquis de conexión de un sensor de temperatura Pt 100 de tres hilos.	40
Figura 3.9. Sensores de temperatura Pt 100 colocados en el equipo TRT-IIUNAM.	41
Figura 3.10. Medidor de flujo tipo turbina instalado en el equipo TRT-IIUNAM.	42
Figura 3.11. Transductores de presión colocados en el equipo TRT-IIUNAM. .	43
Figura 3.12. Equipo de adquisición de datos utilizado durante el primer ensayo TRT.	433
Figura 3.13. Monitor PLC convencional.	44
Figura 3.14. Generador eléctrico S500.	44

	Pág.
Figura 3.15. Componentes que integran la caja eléctrica: a) vista exterior y b) vista interior.....	45
Figura 3.16. Cuadro eléctrico convencional.....	46
Figura 3.17. Primer diseño del equipo TRT-IIUNAM (2020).	46
Figura 3.18. Modificaciones realizadas al equipo TRT-IIUNAM (2021).....	47
Figura 4.1. Localización del sitio de estudio (NTCDCC-2017).....	50
Figura 4.2. Construcción de la pila de energía.	51
Figura 4.3. Separación mínima de inicio y final del bucle de las tuberías de la pila de energía (López-Acosta, Barba- Galdámez, 2020).	51
Figura 4.4. Instalación y montaje de la tubería durante la construcción de la pila de energía.	52
Figura 4.5. Etapas del montaje y la puesta en marcha del equipo TRT-IIUNAM para la prueba en la primera pila de energía construida en Mexico.....	54
Figura 4.6. Perfil de temperatura del suelo del sitio, medido a lo largo de la pila de energía.....	55
Figura 4.7. Temperaturas de entrada, de salida y media del fluido durante el ensayo TRT.	56
Figura 4.8. Potencia del calentador y caudal del fluido durante el ensayo TRT	56
Figura 4.9. Ajuste del del modelo transitorio a los datos medidos <i>in situ</i> obtenidos con la prueba TRT.	57
Figura 4.10. Localización del sitio de estudio (NTCDCC-2017).....	58
Figura 4.11. Temperatura ambiente media en el Municipio de Naucalpan de Juárez (Edo. De México) entre los años 2013 y 2014 y curva sinusoidal idealizada.....	59
Figura 4.12. Variación con la profundidad de la temperatura en el suelo durante un año en la estación meteorológica Totolica San Bartolo, cercana al sitio de estudio en el Municipio de Naucalpan de Juárez, Edo. de México.	60
Figura 4.13. Localización esquemática de los sondeos geotécnicos de la exploración y muestreo.	61
Figura 4.14. Detalles de la exploración geotécnica.	62
Figura 4.15. Corte estratigráfico A-A', obtenido de forma preliminar a partir de los sondeos SPT realizados.....	64
Figura 4.16. Perfil estratigráfico simplificado de la zona de estudio, con base en la exploracion geotecnica <i>in situ</i> y la caracterizacion complementaria hecha en el laboratorio.....	65
Figura 4.17. Determinación de la densidad de sólidos.	66
Figura 4.18. Análisis granulométrico.	66
Figura 4.19. Límite líquido usando el cono sueco.	67
Figura 4.20. Medición de la conductividad térmica con el Método de la Aguja Térmica (equipo KD2 Pro del IIUNAM).....	68
Figura 4.21. Perfil de las propiedades térmicas del suelo del sitio de estudio en Naucalpan de Juárez (Estado de México), obtenidas en el laboratorio.	69
Figura 4.22 Ubicación de los pozos de prueba y de observación.	69
Figura 4.23. Perforación del pozo de prueba: a) Colocación de la tubería de perforación, b) Broca tricónica	70
Figura 4.24. Sección transversal de los pozos para la prueba TRT en el sitio del Estado de Mexico.	70
Figura 4.25. a) Armado rígido para el pozo de prueba y pozo de observación; b) Vista en corte del arreglo <i>in situ</i> del pozo de prueba y pozo de observación	71
Figura 4.26. Implementacion de los pozos de observación y de prueba.....	72

	Pág.
Figura 4.27. Medición de la conductividad térmica en campo.	73
Figura 4.28. Equipo TRT-IIUNAM en campo.	74
Figura 4.29. Preparación de las tuberías para la prueba TRT.	74
Figura 4.30. Perfil de la temperatura media del suelo del sitio de estudio.	75
Figura 4.31. a) Conexión de las tuberías del pozo de prueba al equipo TRT-IIUNAM; b) Revisión de los sensores dentro del equipo TRT-IIUNAM.	75
Figura 4.32. Temperaturas iniciales del fluido (agua) medidas a la entrada y salida del pozo de prueba durante aproximadamente 40 minutos.	76
Figura 4.33. Caja de control del equipo TRT-IIUNAM.	76
Figura 4.34. Registro de temperaturas de entrada y de salida del fluido en la <i>etapa de calentamiento</i> de la prueba TRT.	77
Figura 4.35. Registro de temperaturas de entrada y de salida del fluido en las <i>etapas de calentamiento y recuperación</i> de la prueba TRT en el Estado de México.	78
Figura 4.36. Registros de la variación de la tasa de potencia y caudal hidráulico durante la prueba TRT.	78
Figura 4.37. Conductividad térmica obtenida en la <i>etapa de calentamiento</i>	79
Figura 4.38. Conductividad térmica obtenida en la <i>etapa de recuperación</i>	79
Figura 4.39. Representación esquemática de los resultados obtenidos con el ensayo TRT <i>in situ</i> y las pruebas con la aguja térmica (simple y doble).....	81
Figura 4.40. Variación inicial de la temperatura inicial del suelo con la profundidad, medida el 20 de abril de 2021.....	82
Figura 4.41. Evolución de la temperatura del suelo durante la prueba TRT medida a distintas profundidades en el pozo de observación (80 h de calentamiento y 80 h de recuperación o enfriamiento).	83
Figura 4.42. Variación de la temperatura del suelo con la profundidad a 65 cm de distancia al centro del pozo de prueba.	84
Figura 4.43. Temperatura del ambiente dentro (sensor DHT-22) y fuera (sensor Pt 100) del equipo TRT-IIUNAM durante 160 h de duración de la prueba.....	85
Figura 4.44. Temperatura del ambiente medida en el periodo del 27 de abril al 28 de junio de 2021.....	86
Figura 4.45. Influencia de la temperatura ambiente (medida al medio día) en la temperatura del suelo a diferentes profundidades.....	86
Figura 4.46. Distribucion de la tempertaura del suelo en primavera y verano de 2021.....	87
Figura 4.47. Fluctuacion de la temperatura del suelos a distintas profundiaddes durante 54 días.....	877

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Propiedades térmicas de algunos componentes del suelo (adaptado de Farouki, 1981).....	7
Tabla 2.2. Ensayos para la determinación de la conductividad térmica del suelo.	11
Tabla 2.3. Resultados del ensayo TRT en diferentes países (adaptado de Bandeira Neto, 2015).	18
Tabla 2.4. Consideraciones generales de los principales componentes de un equipo TRT.	21
Tabla 4.1. Propiedades térmicas del sitio al poniente de la CDMX, obtenidas del ensayo TRT en una pila de energía.....	57
Tabla 4.2. Profundidades y coordenadas de localización de los sondeos.	61
Tabla 4.3. Resultados de las pruebas de Ficómetro.....	63
Tabla 4.4. Correlación aproximada entre el esfuerzo cortante in situ del ficómetro y esfuerzo cortante en el laboratorio ((González et al., 2012).	63
Tabla 4.5. Resultados de las pruebas de Presiómetro de Menard.	63
Tabla 4.6. Propiedades índice de las muestras ensayadas del sondeo SPT-2 y del sondeo selectivo SS-01.	67
Tabla 4.7. Propiedades térmicas del suelo obtenidas en el laboratorio.	68
Tabla 4.8 Control de calidad para la mezcla de relleno en la prueba TRT.....	73

NOTACIÓN

A	Área de la sección transversal
A_c	Área de la superficie del cilindro en contacto
A_t	Área de la tubería
A_0	Amplitud máxima anual de la temperatura en la superficie
b_0	Tasa de variación constante de temperatura ambiente para el método de ajuste del equipo de KD2Pro
$b_{1,2}$	Constantes de ajuste del método de ajuste del equipo de KD2Pro
C	Coefficiente de calibración
c_{ce}	Capacidad calorífica específica
c_{cv}	Capacidad calorífica volumétrica
c_p	Calor específico del agua
d	Amortiguamiento de fluctuación anual de la temperatura
D	Difusividad térmica
E_i	Función integral exponencial
f	Factor de fricción
$G(z, t)$	Función de fuente cilíndrica
h_i	Coefficiente de convección
h_{eq}	Resistencia equivalente del pozo
H	Profundidad del pozo
H_i	Carga hidráulica total
J_0, J_1	Funciones de Bessel de primer orden
k	Pendiente de la curva de temperatura versus el tiempo
k_p	Conductividad térmica de la tubería
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
m	Caudal masico del fluido
m_2	Tasa de variación constante de temperatura ambiente
m_3	Pendiente de incremento de temperatura con respecto al logaritmo de temperatura

Notación

P	Potencia de la bomba
q	Transferencia de calor por unidad de longitud
q_{conv}	Tasa de transferencia de calor por convección
Q_h	Caudal hidráulico
\dot{Q}	Calor inyectado
r_b	Radio del pozo
R_b	Resistencia térmica del pozo
R_c	Resistencia térmica del concreto
R_e	Número de Reynolds
R_p	Resistencia térmica de la tubería
S	Pendiente
S_c	Pendiente en la fase de recuperación
S_h	Pendiente en la fase de calentamiento
t	Tiempo
t_h	Tiempo en el que se deja de suministrar calor
T	Temperatura
$T(z, t)$	Función de la temperatura en el suelo
T_0	Temperatura de referencia
T_f	Temperatura del fluido
T_{ff}	Temperatura inicial del suelo
T_g	Temperatura inicial del suelo
T_m	Temperatura media en la superficie
T_{r0}	Temperatura en la pared del cilindro
v	Velocidad del fluido
Y_0, Y_1	Funciones de Bessel de segundo orden
γ	Constante de Euler
ΔP_f	Caída de presión debido a la fricción
ΔT	Cambio de temperatura

η_b	Eficiencia de la bomba
ν	Viscosidad cinemática del fluido
λ	Conductividad térmica del suelo
ρ	Densidad del material
χ_a	Fracción volumétrica de la fase gaseosa de un suelo
χ_{so}	Fracción volumétrica de la fase solida de un suelo
χ_w	Fracción volumétrica de la fase líquida de un suelo
ω	Frecuencia radial anual

1. INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de estructuras sustentables se ha incrementado de manera significativa en los últimos años, debido a que se busca un equilibrio entre la naturaleza y el crecimiento acelerado de la población. Por tal motivo, se requiere que las edificaciones y viviendas brinden la mayor comodidad posible a sus ocupantes, esto incluye principalmente el ahorro en el consumo de energía eléctrica.

El sector de las edificaciones ha optado por el uso de energías renovables como la geotermia de baja entalpía para la generación de electricidad y reducción de gases de efecto invernadero ya que, en el mundo, la construcción de edificaciones es el sector que contribuye con un tercio de las emisiones globales de contaminantes. Las edificaciones residenciales y comerciales consumen el 40% de la energía, 25% del agua, 40% de los recursos globales y 60% de la electricidad. El uso de la energía es para calentamiento y enfriamiento de espacios, ventilación, calentamiento de agua, etc. (Álvarez, 2013).

Durante más de 20 años en Europa, Asia y Norteamérica el acondicionamiento de espacios se ha logrado gracias al uso de Bombas de Calor Geotérmico (BCG) las cuales son maquinas térmicas capaces de utilizar la diferencia de temperatura entre el suelo y el ambiente para el acondicionamiento de espacios y el abastecimiento de agua caliente (López Acosta y Barba Galdaméz, 2018). Los sistemas cerrados de BCG (pozos intercambiadores, pilas de energía y estructuras termoactivas en general) representan una de las técnicas más prometedoras a nivel mundial para responder a la creciente demanda energética para la climatización de edificaciones (De Moel *et al.*, 2010). El diseño eficiente de estos sistemas requiere de la determinación de las propiedades térmicas de los suelos, particularmente la conductividad térmica (λ), y la resistencia térmica del pozo de prueba (R_b) (Gehlin, 2002). El primer parámetro es específico del sitio de estudio y el segundo está influenciado por el diámetro del pozo, la configuración de la tubería, y el material de relleno para la realización de la prueba. El uso de estos sistemas representa una alternativa en el consumo de energía renovable por su alta eficiencia ya que, reduce el consumo de energía de un 30 a 60% con respecto a los sistemas convencionales de acondicionamiento.

El diseño eficiente de sistemas cerrados de BCG requiere de la determinación de las propiedades térmicas del suelo. El ensayo de respuesta térmica (*Thermal Response Test*, TRT) es la prueba de referencia en la industria geotérmica para la estimación de estos parámetros, ya que permite obtener valores promedio de conductividad térmica de los suelos y resistencia térmica de la perforación en condiciones reales de campo (Amis y Loveridge, 2014). El ensayo consiste en inyectar (o extraer) energía calorífica al suelo a través de una tubería en bucle por la que circula un fluido transmisor de calor (intercambiador de calor) y monitorear las temperaturas de entrada y de salida del fluido durante un periodo de varios días. Posteriormente estos datos se analizan utilizando modelos teóricos de transferencia de calor (Witte, 2016). Conceptualmente, los TRT son similares a una prueba de bombeo para la determinación del coeficiente de permeabilidad de los suelos (Raymond *et al.*, 2011). El ensayo de respuesta térmica o TRT es una alternativa económicamente viable para la determinación *in situ* de la conductividad térmica promedio y la resistencia térmica del pozo de un estrato de suelo a la profundidad deseada.

Como parte de un proyecto de investigación llevado a cabo por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) para la caracterización de las propiedades térmicas de los suelos nacionales, se han medido en el Laboratorio de Mecánica de Suelos las propiedades

térmicas de distintos suelos en el país (Santa Fe en CDMX, Ex Lago de Texcoco en el Estado de México, Paraíso, Tabasco) con el método de la aguja térmica mediante el equipo *KD2 Pro*, fabricado por Decagon Devices Inc., obteniéndose resultados satisfactorios.

Esta investigación está enfocada en la realización del Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) en dos sitios diferentes, al poniente de la CDMX y al noreste del Estado de México respectivamente. El trabajo abarca desde el diseño del circuito interno de funcionamiento del equipo de respuesta térmica, la selección de los materiales para la construcción del equipo móvil, la interpretación de los resultados y la comparación con los resultados obtenidos en laboratorio con la prueba de la aguja térmica para caracterizar las propiedades térmicas del suelo. Realizar la prueba *in situ* proporciona la oportunidad de comparar y validar los resultados obtenidos en campo con los de laboratorio, además de que se reconozca a México entre los países que realizan el ensayo de respuesta térmica (TRT). Los resultados obtenidos también contribuyen a la actualización del conocimiento sobre las propiedades térmicas de los suelos mexicanos.

El objetivo general de esta tesis es diseñar, construir, calibrar y poner en marcha un equipo móvil de respuesta térmica (denominado TRT-IIUNAM) para llevar a cabo pruebas TRT en nuestro país. La intención es poder determinar las propiedades térmicas *in situ* requeridas para el diseño e implementación de sistemas que dependen del transporte de calor conductivo en el suelo, como los pozos intercambiadores de calor (BHE), pilas de energía y otras estructuras termoactivas.

Los objetivos específicos abarcan, en primer lugar, diseñar e implementar el circuito interno de funcionamiento del equipo de respuesta térmica (TRT). En segundo lugar, determinar la conductividad térmica de los dos sitios de estudio mediante el ensayo de respuesta térmica (TRT) con base en la norma ISO-17628:2015 *“Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos geotérmicos. Determinación de la conductividad térmica de suelos y rocas utilizando una sonda geotérmica instalada en un sondeo”*. En tercer lugar, determinar la temperatura del suelo durante un periodo de 3 meses. Posteriormente comparar y validar los resultados obtenidos en la prueba TRT *in situ* con la conductividad térmica obtenida en laboratorio mediante el método de la aguja térmica. Por último, analizar los resultados con la teoría de conducción de calor en sólidos ocasionado por una fuente de calor lineal e infinita.

La presente tesis se estructura en cinco capítulos. El Capítulo 1 es la introducción de esta tesis. En el Capítulo 2 se presenta una descripción general de las propiedades térmicas de los suelos, así como, la analogía que existe entre las pruebas de bombeo y el ensayo de respuesta térmica. También se presenta una revisión bibliográfica sobre los sistemas de almacenamiento de calor más comunes y los principales componentes del equipo de respuesta térmica, así como el procedimiento de prueba. Al finalizar este capítulo se describen los modelos analíticos y numéricos más empleados para la determinación de la conductividad térmica del suelo.

En el Capítulo 3 se describen las características de los componentes hidráulicos, dispositivos de trabajo, dispositivos de medición y sistema de adquisición de datos que componen el circuito interno de funcionamiento del equipo de respuesta térmica TRT-IIUNAM implementado. Se presentan también figuras esquemáticas del equipo de respuesta térmica.

En el Capítulo 4 se describe el ensayo de respuesta térmica (TRT) ejecutado en una pila de energía ubicada al poniente de la CDMX y en un pozo de prueba ubicado al noreste del Estado de México. Se describe la localización, la geología, y la estratigrafía de las zonas de estudio. También describen las pruebas de campo realizadas y su ubicación dentro del sitio. Se mencionan las pruebas efectuadas para llevar a cabo la caracterización del sitio, la determinación de las propiedades índice, límites líquidos y límites plásticos. Se presentan los parámetros térmicos del ensayo de respuesta térmica (TRT) y los determinados en el laboratorio con los sensores de aguja simple y aguja doble. Al finalizar este capítulo, se presentan los perfiles de temperatura medidos durante y después de la prueba TRT.

En el último capítulo se dan las conclusiones generales de la tesis.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Flujo de calor en suelos

2.1.1. Transferencia de calor en suelos

El conocimiento de las propiedades térmicas de los suelos es de importancia en diferentes aplicaciones dentro de la ingeniería geotécnica tales como el diseño de estructuras termoactivas, el aislamiento de sistemas de transmisión subterráneos, el almacenamiento de desechos sólidos radiactivos, y estabilización térmica de los suelos (Farouki, 1981). La transferencia de calor en los suelos puede efectuarse de diferentes formas, como conducción, radiación y convección, las cuales se describen a continuación.

(a) Conducción

La conducción es el mecanismo predominante en los suelos saturados de grano fino. Está ocurre cuando el calor fluye a través de la interacción entre partículas debido a un gradiente térmico y se encuentra definida por la ecuación de Fourier-Biot (Brandl, 2006):

$$\rho c_{ce} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q_v \quad (2.1)$$

donde ρ es la densidad del material, c_{ce} es la capacidad calorífica específica, T es la temperatura, t es el tiempo, λ es la conductividad térmica y q_v es la tasa de generación de energía por unidad de volumen.

(b) Convección

En los suelos se asume que las partículas permanecen estáticas y la convección solamente se atribuye al transporte de vapor y agua en los poros (Rees *et al.*, 2000) la transferencia de calor por convección transporta el calor entre las zonas con diferentes temperaturas, ocasionando diferencias de densidad. El fluido transporta el calor creando un patrón de flujo, que también facilita la transferencia por conducción (Farouki, 1981). El flujo de calor generado por la convección de líquidos se da como:

$$q_{lconv} = c_1 \rho_1 \bar{v}_1 (T - T_0) \quad (2.2)$$

donde c_1 es la capacidad calorífica específica del agua en el suelo, ρ_1 es la densidad del agua, \bar{v}_1 es el vector de velocidad del agua y T_0 es la temperatura de referencia (Rees, *et al.*, 2000). Entre más rápido sea el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor.

(c) Radiación

La transferencia de calor por radiación se produce a través de los espacios aéreos, es decir, por la energía térmica propagada como ondas electromagnéticas. La temperatura del cuerpo que emite radiación es el factor más importante, ya que el flujo de calor es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. En los suelos, la transferencia de calor por radiación puede considerarse insignificante, ya que representa una contribución menor al 1% de la transferencia de calor total (Vieira *et al.*, 2017).

2.1.2. Propiedades térmicas de los suelos

(a) Conductividad térmica

La conductividad térmica se define como la cantidad de calor que pasa a través de una sección transversal de suelo en un tiempo determinado bajo un gradiente de temperatura unitario (Farouki, 1981). La conductividad térmica se incrementa con el contenido de agua causando cambios de temperatura en el suelo (Rojas *et al.*, 2007). Matemáticamente se expresa mediante la ecuación:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

donde el signo menos (-) indica que el flujo de calor se produce de caliente a frío, q es el flujo de calor por unidad de tiempo o por unidad de área, λ es la conductividad térmica, dT/dx es el gradiente de temperatura a través del medio conductor (Nope y de Santiago, 2014). En el Sistema Internacional (SI) la conductividad térmica se expresa como $W m^{-1}K^{-1}$.

(b) Difusividad térmica

La difusividad térmica es la tasa de cambio con la que un material aumenta su temperatura y suele expresarse en $cm^2 s^{-1}$. Mide la capacidad de un material para conducir energía térmica en relación con su capacidad de almacenar energía térmica.

$$D = \frac{\lambda}{c_{cv}} \quad (2.4)$$

donde λ es la conductividad térmica del suelo y c_{cv} es la capacidad calorífica volumétrica. Un material con un valor alto de difusividad térmica, responde más rápido a los cambios de temperatura (Farouki, 1981).

(c) Capacidad calorífica

La capacidad calorífica es la energía necesaria para aumentar en un grado la temperatura. Puede expresarse por unidad de volumen ($J m^{-3} ^\circ C^{-1}$) como capacidad calorífica volumétrica c_{cv} , o por unidad de masa ($J kg^{-1}C^{-1}$) como capacidad calorífica específica c_{ce} . La capacidad calorífica volumétrica es el producto del calor específico por su densidad ρ .

$$c_{cv} = c_{ce}\rho \quad (2.5)$$

De acuerdo a Rees *et al.* (2000) la capacidad calorífica específica suele determinarse a partir de la capacidad calorífica específica de los diferentes componentes del suelo. Por lo tanto, la capacidad calorífica puede expresarse como:

$$c_s = c_{so}\chi_{so} + c_w\chi_w + c_a\chi_a \quad (2.6)$$

donde c_{so} , c_w y c_a son la capacidad calorífica específica de la parte sólida, agua y aire respectivamente; mientras que χ_{so} , χ_w , y χ_a son las fracciones volumétricas de los componentes del suelo. Las fracciones volumétricas de un suelo se calculan considerando la porosidad η y el grado de saturación S_r . Por tanto, se aplican las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\chi_{so} &= 1 - \eta \\ \chi_w &= \eta S_r \\ \chi_a &= \eta(1 - S_r)\end{aligned}$$

En la Tabla 2.1 se muestran los valores típicos de las propiedades térmicas de algunos componentes del suelo presentados en Farouki (1981). La relación entre la conductividad térmica λ , la difusividad térmica D y la capacidad calorífica volumétrica c_{cv} es (Portillo Arreguín, 2019):

$$\lambda = Dc_{cv} \quad (2.7)$$

Tabla 2.1. Propiedades térmicas de algunos componentes del suelo (adaptado de Farouki, 1981).

Material	Densidad ρ (g cm ⁻³)	Conductividad térmica, λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Capacidad calorífica específica, c_{cs} (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Capacidad calorífica volumétrica, c_{cv} (J m ⁻³ °C ⁻¹)	Difusividad térmica, D (10 ⁻³ cm ² s ⁻¹)
Cuarzo	2.65	8.4	0.73	1.924	43
Minerales arcillosos	2.65	2.9	0.73	1.924	15
Materia orgánica	1.30	0.25	1.92	2.510	1.0
Agua	1.0	0.6	4.14	4.184	1.42
Aire	0.0012	0.026	1.004	0.0012	0.21

2.1.3. Aplicaciones de los sistemas de calor geotérmico

Los recursos geotérmicos de baja entalpía representan un gran potencial de energía renovable y amigable con el medio ambiente, en relación con cimentaciones profundas (pilas de energía) y bombas de calor geotérmico. La energía geotérmica se puede obtener a partir de colectores horizontales o en zanjas y pozos intercambiadores de calor. Desde principios de la década de 1980 en Austria y Suiza la energía geotérmica se ha obtenido a partir de elementos que se colocan en la cimentación como losas, pilas, pilotes (1984) y muros diafragma (1996). Esta innovación aprovecha la alta capacidad de almacenamiento térmico del concreto para hacer funcionar el sistema de captación de energía geotérmica de baja entalpía (Brandl, 2006).

(a) Bombas de Calor Geotérmico (BCG)

Las Bombas de Calor Geotérmico (BCG) son máquinas capaces de transferir calor de una fuente fría a una caliente utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña (Conti,

2015). Las BCG extraen energía térmica del suelo en invierno transfiriéndola al interior de una edificación, mientras que en verano se extrae el calor del interior de la edificación y lo devuelven al suelo. Las BCG se utilizan principalmente para la climatización de espacios y el abastecimiento de agua caliente. Las BCG se diseñan para operar a pocos metros de profundidad (0-50 m) y su diseño se basa en que, a partir de cierto nivel, la temperatura del suelo permanece constante en todo el año. Las BCG se clasifican en dos tipos: sistemas abiertos y cerrados. En los sistemas abiertos la transferencia de calor entre la edificación y el suelo se efectúa de forma directa a través de la extracción de agua subterránea y posterior reinyección. En los sistemas cerrados, la transferencia de calor se desarrolla en forma indirecta a partir de un sistema cerrado de tuberías (Barba Galdaméz, 2018).

Las BCG constan de tres componentes principales: el circuito primario, el circuito secundario y la propia bomba de calor. El circuito primario consiste en un sistema cerrado de tuberías instalado dentro de los elementos en contacto con el terreno. A través de estas tuberías se bombea un fluido conductor de calor (principalmente agua) que permite el intercambio de energía con el suelo. El circuito secundario está conformado por una red cerrada de tuberías de calefacción que se incrustan en los pisos y las paredes de la edificación. Los dos circuitos se conectan a través de una bomba de calor que se encarga de ajustar la temperatura a niveles útiles para la climatización de las edificaciones y la transferencia de calor entre los componentes (Barba Galdaméz y López Acosta, 2018).

El funcionamiento de las BCG para la calefacción de edificaciones durante el invierno consiste en extraer energía térmica del campo de captación geotérmico. El circuito primario cede el calor al interior de la edificación por medio del circuito secundario por donde circula el fluido intercambiador de calor. Para la refrigeración se invierte el funcionamiento de la BCG, en este caso el circuito secundario se encarga de extraer el calor de la edificación e inyectarlo al terreno por medio del circuito primario (Figura 2.1). La utilización de sistemas BCG tiene muchos beneficios, los cuales incluyen una reducción en el consumo de energía eléctrica (hasta un 72% en comparación con la calefacción por resistencia eléctrica y el aire acondicionado estándar), también trae consigo menor mantenimiento y mayor comodidad para los habitantes (CeMIEGeo, 2016).

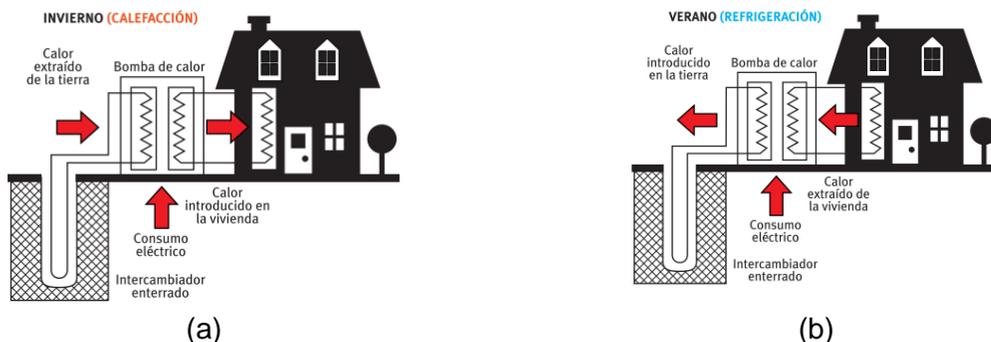


Figura 2.1. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmico (a) calefacción, (b) refrigeración. (ATECYR, 2012).

(b) Estructuras termoactivas

Las estructuras termoactivas son elementos estructurales (pilas, losas, muros, túneles, etc.) que almacenan o liberan energía mediante un sistema cerrado de tuberías que funciona

como un tipo especial de bombas de calor geotérmico (BCG). Esta tecnología fue utilizada inicialmente en la década de los ochenta en Austria y Suiza. Los dos sistemas esenciales son las pilas que intercambian calor con el terreno y las losas termoactivas que aprovechan su elevada inercia térmica como instalación de climatización de un edificio para proporcionar un ambiente interior constante de alta calidad (Hosokawa-Menendez, 2019).

Las pilas termoactivas o pilas de energía son una tecnología que se utiliza para la calefacción o enfriamiento de edificios empleando intercambiadores de calor en pozos o perforaciones verticales (BHE, Borehole Heat Exchanger) cuya función principal es almacenar calor durante el verano y producir frío en el invierno con ayuda de una bomba de calor geotérmico. La configuración habitual del sistema consta de una serie de tuberías en circuito cerrado instaladas dentro de una perforación vertical, donde se hace circular un fluido (generalmente agua) para realizar un intercambio térmico con el suelo. La disposición puede ser vertical y horizontal. El flujo de temperatura depende de las necesidades del edificio, el clima de la región o de las estaciones del año (Brandl, 2006). Las pilas de energía requieren menor profundidad de instalación y son económicamente más viables cuando se trata de una instalación en conjunto con la cimentación del edificio. Además, la alta capacidad térmica del concreto contribuye a la operación del sistema (Brandl, 2006).



(a)



(b)

Figura 2.2. Instalación de tuberías de intercambio de calor en: a) pila y b) losa (Brandl, 2006; Villanueva-Peñalver y Gutiérrez-Fernández-Cuervo, 2019).

2.2. Estimación de las propiedades térmicas del suelo en laboratorio y campo

La conductividad térmica en suelos y rocas puede obtenerse mediante pruebas de laboratorio o ensayos de campo. La determinación de los parámetros térmicos es de importancia para diseñar la profundidad, disposición y número de pozos que permita un adecuado rendimiento energético. Si se sobrestima el valor de la conductividad térmica del suelo durante el diseño, la longitud total calculada del pozo intercambiador de calor necesaria para suministrar la demanda de calefacción o refrigeración requerida por un edificio resulta inferior a la medida. Por lo tanto, todo el sistema de bombas de calor terrestres (GSHP) tiene una menor eficiencia energética de la bomba de calor y un menor consumo de energía eléctrica. Por otro lado, si se subestima la capacidad del pozo intercambiador, la longitud total del pozo resulta mayor de lo necesario y los costos de instalación del campo de perforación son mayores, la eficiencia energética operativa resulta mayor que el valor establecido en la fase de diseño (Dalla Santa *et al.*, 2020).

Las pruebas de laboratorio presentan algunas ventajas respecto a los ensayos de campo, entre las que se incluyen menor costo y rapidez de ejecución. Sin embargo, las pruebas de laboratorio se realizan sobre muestras extraídas de estratos específicos que no permiten

reproducir adecuadamente las condiciones reales de campo, tales como la presencia de flujo de agua y los efectos de escala que afectan las propiedades térmicas del suelo. Además, requieren de una adecuada extracción, transporte y manejo de muestras, lo cual implica un aumento de costos y tiempo. Los resultados de laboratorio tienden a dar resultados del valor de la conductividad térmica visiblemente menores que los que se obtienen en campo, principalmente con el ensayo de respuesta térmica (Loveridge, Low, y Powrie, 2017).

Diversos autores han llevado a cabo mediciones de la conductividad térmica *in situ* realizando pruebas TRT y en laboratorio con el sensor de aguja térmica y otros métodos transitorios. Algunos resultados de estas pruebas se presentan en la Figura 2.3. Los parámetros medidos con una prueba TRT suelen ser mayores que los obtenidos en laboratorio. Los resultados obtenidos en estas investigaciones se interpretaron utilizando el modelo de fuente lineal, y en algunos casos mediante análisis de elemento finito.

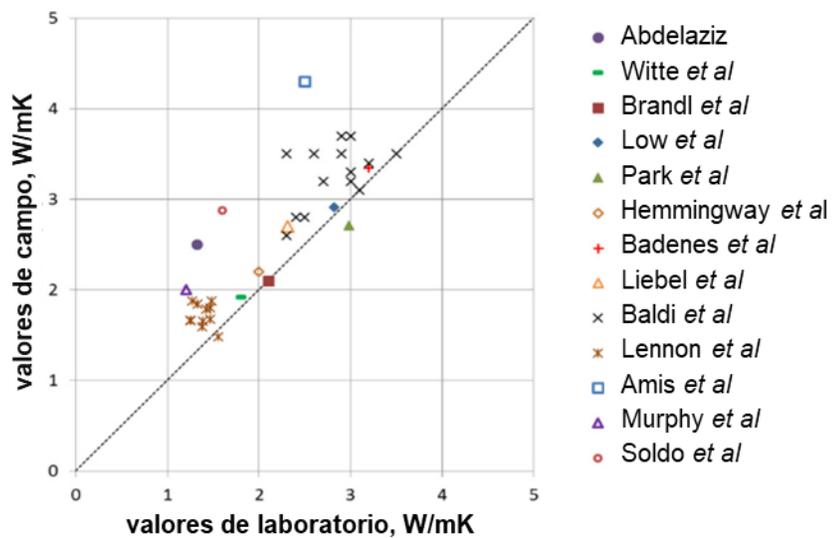


Figura 2.3. Comparación de los valores de conductividad térmica obtenidos en campo y laboratorio (adaptado de Vieira *et al.*, 2017).

La realización de ensayos en campo permite determinar las propiedades térmicas en condiciones reales (Akrouch *et al.*, 2016). El ensayo de respuesta térmica TRT toma en cuenta las condiciones específicas del sitio, como la presencia de capas litológicas y el flujo de agua subterránea debido al gran volumen de suelo involucrado en el intercambio de calor durante el ensayo, lo que impacta directamente en las propiedades térmicas efectivas (Dalla Santa *et al.*, 2020). Una prueba TRT generalmente proporciona un valor equivalente de la capacidad de intercambio térmico local en todo el contexto geológico (Gehlin, 2002).

Las pruebas de campo y laboratorio comúnmente se clasifican en dos categorías: establecidas o estacionarias y transitorias. En los métodos en condiciones establecidas, la temperatura del suelo se mantiene constante mientras se somete a un gradiente térmico y el flujo a través de él se estabiliza. En los métodos de condiciones transitorias la temperatura del suelo varía con el tiempo. Estas pruebas tienen una menor duración, puesto que las mediciones se llevan a cabo durante los incrementos de temperatura, es decir, un cuerpo se calienta en la medida que transcurre el tiempo, la velocidad con la que ocurre el calentamiento depende principalmente de la difusividad térmica del material

(Vieira *et al.*, 2017). En la Tabla 2.2 se presenta un listado de los diversos métodos de ensayo para la determinación de la conductividad térmica de un suelo.

Tabla 2.2. Ensayos para la determinación de la conductividad térmica del suelo.

Tipo de ensayo	Nombre	Referencia
Transitorio	Método de la aguja térmica (<i>needle probe method</i>)	ASTM D5334 De Vries y Peck (1958)
	Método de fuente plana transitoria (<i>transient plane heat source</i>)	ISO 22007
	Ondas de temperatura periódicas (<i>periodic temperatura waves</i>)	Hoekstra et al. (1973)
	Método de golpe térmico (<i>thermal shock method</i>)	Shannon y Wells (1947)
	Cono térmico (<i>thermal cone test</i>)	Akrouch et al. (2016)
Estacionario	Pruebas de placa caliente (<i>guarded hot-plate apparatus</i>)	ASTM C177
	Configuración cilíndrica (<i>cylindrical configuration test</i>)	Kersten (1949)
	Esfera <i>in situ</i> (<i>in situ sphere meter</i>)	Mochlinski (1964)
	Ensayo de respuesta térmica (<i>thermal response test</i>)	ISO 17628

2.3. Método de aguja térmica

La conductividad térmica de un suelo puede medirse directamente en el laboratorio mediante el método de la aguja térmica que funciona como un conductor de línea. Las sondas o agujas térmicas son métodos transitorios cuyas dimensiones son conocidas y tiene una fuente de calor que se sumerge en un medio. Comúnmente las agujas tienen un diámetro de 2 a 6 mm y una longitud de 45 mm o más. Para suelos blandos, la sonda se inserta directamente en el material, mientras que en suelos duros se requiere de una perforación previa (Vieira *et al.*, 2017).

El método de la aguja térmica se basa en la teoría de conducción de calor en sólidos ocasionado por una fuente de energía lineal e infinita que permite estimar la conductividad térmica a partir de la disipación de calor entre la sonda y el medio. Este método se lleva a cabo de acuerdo a las especificaciones descritas en la norma ASTM D 5334-14 "Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure". Uno de los dispositivos más empleados para la determinación de la conductividad térmica de un suelo en el laboratorio es el equipo KD2-PRO desarrollado por Decagon Devices. El sensor de aguja simple TR tiene una sonda de 2.4 mm de diámetro y 10 cm de longitud, la sonda está diseñada para medir la conductividad térmica de suelos y materiales granulares o porosos con un rango de trabajo de 0.1 a $4 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Figura 1.4). El sensor de aguja doble SH-1 (Figura 1.5) tiene dos agujas de 1.24 mm de diámetro y 3 cm de largo y tienen 6 mm de separación entre sí. Este sensor también es capaz de medir la resistividad térmica, capacidad calorífica volumétrica y difusividad térmica. Este sensor se ocupa principalmente en suelos granulares. Los sensores TR-1 y SH-1 no están diseñados para usarse en líquidos.

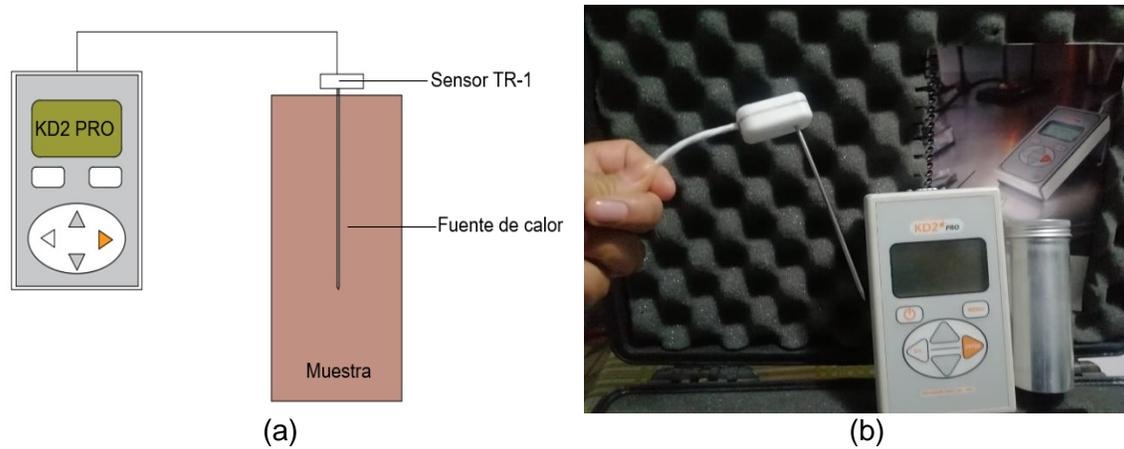


Figura 2.4. a) Esquema de configuración de medición con el sensor de la aguja simple del equipo KD2-PRO; b) Sensor de aguja simple TR-1.

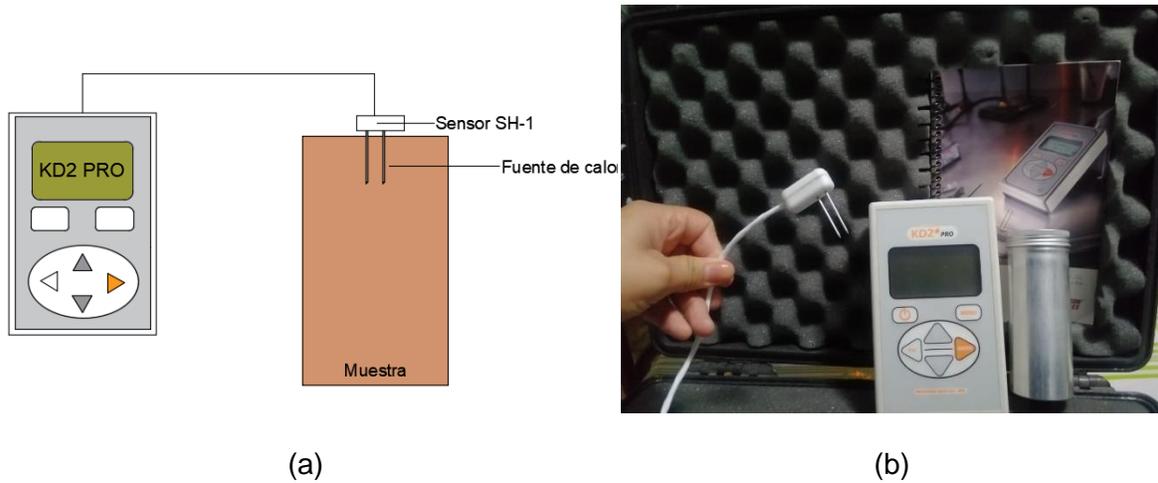


Figura 2.5. a) Esquema de configuración de la medición con el sensor de la aguja doble del equipo KD2-PRO; b) Sensor de aguja doble SH-1.

2.3.1. Desarrollo de la prueba

La prueba consiste en dos etapas. La primera etapa se denomina de calentamiento donde se inyecta un flujo de calor constante durante 15 minutos hasta que la muestra alcance el equilibrio térmico con el medio. En la etapa de recuperación se apaga la fuente de calor y se registra la disminución de la temperatura

(a) Calibración

El equipo de la aguja térmica debe ser calibrado antes de usarse debido a que existe una desviación en los resultados obtenidos experimentales y los resultados calculados. La calibración se realiza comparando la determinación experimental de la conductividad térmica de un material estándar con propiedades conocidas $\lambda_{material}$ con la medición efectuada por el equipo $\lambda_{medición}$. El factor C de calibración se calcula como (ASTM D5334-14, 2014):

$$C = \frac{\lambda_{material}}{\lambda_{medición}} \quad (2.8)$$

La calibración estándar de la aguja térmica se puede realizar con distintos materiales cuya conductividad térmica sea conocida. Los materiales adecuados incluyen arena seca de Ottawa, glicerina anhidra al 99%, cuyo valor de conductividad térmica conocida es de $0.286 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. También se puede utilizar una mezcla de agua estabilizada con 5 g por litro de agar con un valor conocido de conductividad térmica de $0.607 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ a 25°C . El patrón de calibración debe tener forma de cilindro. El diámetro del cilindro debe ser de al menos 10 veces el diámetro de la sonda de la aguja térmica y la longitud debe ser 20% más larga que la sonda de la aguja térmica. La conductividad medida de la muestra debe tener una diferencia máxima admisible del 10% del valor teórico.

El equipo KD2-PRO está equipado con un material de calibración estándar, el cual es un bloque de silicón epóxico con una conductividad térmica de $0.99 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$.

(b) Dimensiones de las muestras a ensayar

El espécimen de ensayo debe tener un diámetro mínimo de 50 mm con una altura de 100 ± 30 mm. De acuerdo a la norma ASTM D5334-14 (2014) las muestras reconstituidas deben compactarse a la densidad y el contenido de agua deseados utilizando la técnica de compactación adecuada.

2.3.2. Método de interpretación de la aguja térmica

(a) Métodos de interpretación del equipo KD2 Pro

Se emplea un método de flujo de calor transitorio y lineal mediante el uso de un sensor de temperatura cuyas mediciones efectuadas deben ajustarse. Al utilizar el sensor de aguja simple se asume que los cambios de temperatura durante la etapa de calentamiento se registran de la siguiente manera:

$$T - T_0 = m_2 t + m_3 \ln t \quad (2.9)$$

donde T_0 es la temperatura inicial de medición ($^\circ\text{C}$) en el tiempo $t=t$, m_2 es la tasa de desviación de la temperatura ambiente, m_3 es la pendiente de la recta de la temperatura versus el logaritmo de temperatura. Durante la etapa de recuperación la temperatura T se determina como:

$$T = m_1 + m_2 t + m_3 \ln \left[\frac{t}{t - t_h} \right] \quad (2.10)$$

La conductividad térmica λ se calcula con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{q}{4m_3} \quad (2.11)$$

Donde q es el flujo de calor aplicado a través de la aguja térmica por unidad de longitud.

Los últimos dos tercios de los datos obtenidos durante la etapa de calentamiento y recuperación tienen una mejor representación de la conductividad térmica debido a que las ecuaciones corresponden a aproximaciones de la integral exponencial.

El equipo KD2 Pro contiene una aguja doble cuyo funcionamiento consiste en que el calor se aplica en una sola por un tiempo y la temperatura se registra con la aguja que está a 6 mm de distancia en la fase de calentamiento y enfriamiento (Decagon Devices, 2016). Los cambios de temperatura T^* registrados por el sensor en la etapa de calentamiento y recuperación se determinan de la siguiente manera:

Para $t \leq t_1$

$$T^* = b_0 t + b_1 E_i \left(\frac{b_2}{t} \right) \quad (2.12)$$

Para $t > t_1$

$$T^* = b_0 t + b_1 \left\{ E_i \left(\frac{b_2}{t} \right) - E_i \left(\frac{b_2}{t - t_h} \right) \right\} \quad (2.13)$$

Donde b_0 , b_1 y b_2 son constantes de ajuste, E_i es la integral exponencial.

Por lo tanto, T^* queda definida como:

$$T^* = \frac{4\pi(T - T_0)}{q} \quad (2.14)$$

Donde T_0 es la temperatura ambiente al inicio de las mediciones.

Para el caso de la aguja doble la conductividad y difusividad térmica se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = \frac{1}{b_1} \quad (2.15)$$

$$D = \frac{r^2}{4b_2} \quad (2.16)$$

El equipo calcula los parámetros b_0 , b_1 y b_2 a partir del método de mínimos cuadrados no lineales de Marquadt (1963).

(b) Método simplificado (2014)

Para la determinación de las propiedades térmicas empleando el sensor de la aguja simple es posible efectuar un análisis simplificado de la prueba considerando que, para valores pequeños del argumento x , la integral exponencial puede aproximarse como (Portillo Arreguín *et al.*, 2018):

$$E_i(-x) \approx \gamma + \ln(x) \quad (2.17)$$

Donde γ es la constante de Euler igual a 0.5772. Dicha condición se satisface para valores pequeños de r y valores de t . De acuerdo a la norma ASTM D5334-14 (2014) en el análisis se excluyen los primeros 10 a 30 segundos de la prueba en las etapas de calentamiento y recuperación. Por lo tanto, la ecuación de la etapa de calentamiento se reduce a (Portillo Arreguín, 2019):

$$\Delta T \cong \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \frac{Q}{4\pi\lambda} \gamma \quad (2.18)$$

La ecuación para la etapa de recuperación se expresa como:

$$\Delta T \cong \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{t}{t-t_h}\right) + \frac{Q}{4\pi\lambda} \gamma \quad (2.19)$$

Las ecuaciones 3.16 y 3.17 tienen la forma de una ecuación lineal respecto al logaritmo del tiempo, en las que la pendiente S depende únicamente de la conductividad térmica:

$$S = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (2.20)$$

La pendiente puede obtenerse mediante una regresión lineal. En la etapa de calentamiento se grafica la temperatura contra $\ln(t)$ para obtener la pendiente S_h , en la etapa de recuperación se grafica la temperatura contra $\ln(t/(t-t_h))$ para obtener la pendiente S_c .

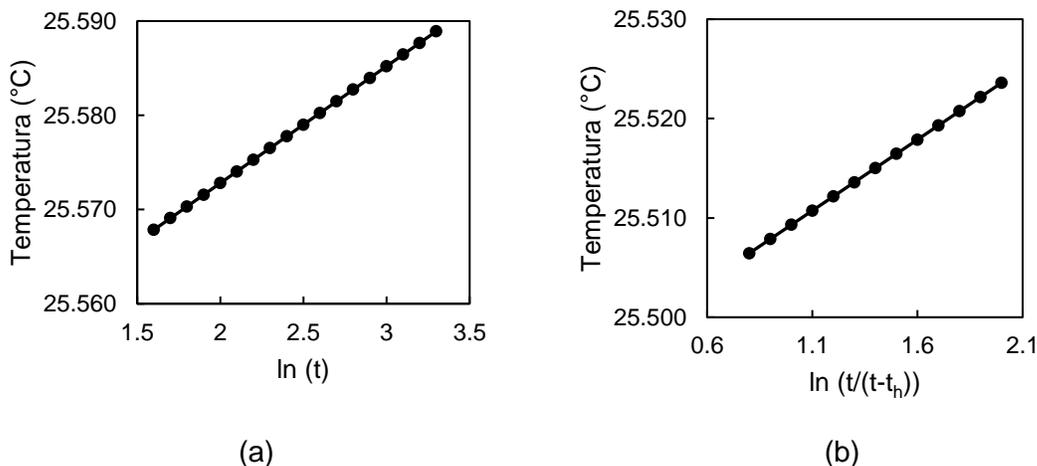


Figura 2.6. Gráficos obtenidos de la norma ASTM D5334-014: a) Pendiente S_h en la etapa de calentamiento, b) Pendiente S_c en la etapa de recuperación.

La conductividad térmica se obtiene como (ASTM D5334-14):

$$\lambda = \frac{Cq}{4\pi S} \quad (2.21)$$

Donde C es una constante de calibración y q es el calor aplicado por unidad de tiempo (W/h).

2.4. Descripción de un ensayo de respuesta térmica (TRT)

2.4.1. Antecedentes

El almacenamiento subterráneo de energía térmica o UTES (*Underground Thermal Energy Storage*) es una tecnología sostenible que se emplea para la calefacción y enfriamiento de edificios. El acrónimo UTES se refiere al almacenamiento de energía térmica subterránea en general, y a menudo se divide en subgrupos según el tipo de medio de almacenamiento que se utiliza. Generalmente una de las técnicas más empleadas para este tipo de aprovechamiento son los BHE (*Borehole Heat Exchanger*) que se refiere a sistemas de almacenamiento que utilizan pozos o conductos y tuberías en el suelo. La conductividad térmica del suelo (λ) y la resistencia térmica (R_b) del pozo son los parámetros más importantes para el diseño de estos sistemas. Estos dos parámetros pueden determinarse a partir de mediciones en campo que proporcionan datos de diseño confiables (ECES, 2013). El método de medición económicamente viable y que ha logrado desarrollarse rápidamente en los últimos 30 años es el ensayo de respuesta térmica o TRT (*Thermal Response Test*).

La base teórica del TRT se estableció durante varias décadas (Choudary, 1976; Mogensen, 1983; Claesson et al., 1985; Claesson y Eskilson, 1988; Hellström, 1991). El primer documento que sugiere equipos móviles de TRT fue presentado por Mogensen en 1983 en la “*International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*” en Estocolmo. En 1985 Mogensen sugirió un sistema con un fluido portador de calor que circulaba a través de un sistema GHEX (*Ground Heat Exchanger*) a una velocidad de extracción de calor constante, mientras que la temperatura de salida del fluido dentro del sistema se registraba continuamente. Este método se utilizó para evaluar los sistemas GHEX, antes de que existiera el primer TRT móvil (Mogensen, 1985; Eskilson, 1987; Nordell, 1994; Hellström, 1994).

El primer dispositivo de medición móvil se desarrolló en Suecia en la Universidad Tecnológica de Luleå por Signhild Gehlin en 1995 (Gehlin, 2002). De forma casi simultánea, en 1996 se presentó un dispositivo similar en la Universidad Estatal de Oklahoma en Estados Unidos de América desarrollado por Warren Adam Austin (Figura 2.7). Ambos aparatos se basan en el concepto de Mogensen (1983) pero con un calentador en lugar de un enfriador (ECES, 2013). Desde entonces, se ha reunido una gran cantidad de experiencia práctica tanto en la configuración de la prueba (precisión, confiabilidad, transporte, accesibilidad al sitio, etc.) como en la comprensión de los diferentes métodos para su evaluación (Sauer et al., 2012).



(a) Gehlin-Suecia (1995)



(b) Austin-USA (1996)

Figura 2.7. Primeros equipos de respuesta térmica.

Algunos países de América Latina como Chile, Brasil y Ecuador, han desarrollado sus propios equipos de respuesta térmica y han llevado a cabo el ensayo TRT, presentando resultados satisfactorios que les da la posibilidad de diseñar sistemas de pozos intercambiadores de calor para la calefacción o enfriamiento de edificios.



(a) Chile, Universidad Técnica Federico Santa María (2003)



(b) Chile, Universidad de Chile (2012)



(c) Brasil, Universidad de São Paulo (2015)



Figura 2.8. Otros equipos TRT y ensayo de respuesta térmica.



(d) Ecuador, Escuela Superior Politecnica del Litoral (2014)

Figura 2.8. (Continuación). Otros equipos TRT y ensayo de respuesta térmica.

En la Tabla 2.3 se presenta un resumen de las conductividades térmicas obtenidas por varios autores con ensayos de respuesta térmica en pozos de diferentes diámetros y profundidades.

Tabla 2.3. Resultados del ensayo TRT en diferentes países (adaptado de Bandeira Neto, 2015).

Autor	País	Temperatura del suelo (°C)	Diámetro de la perforación (m)	Profundidad del pozo (m)	Conductividad térmica (W/mK)
Gehlin y Nordell (1998)	Suecia	8-10.5	0.1-0.16	115-197	3.2-5.5
Bosso <i>et al</i> (2003)	Chile	–	0.12	16.5-20.5	1.8
Roth <i>et al</i> (2004)	Chile	–	0.25-0.5	16.9	1.8
Esen y Inalli (2009)	Turquía	15.7	0.150	30-90	1.70
Sharqawy <i>et al</i> (2009)	Arabia Saudita	32.6	0.20	80	2.154
Georgiev <i>et al</i> (2010)	Bulgaria	–	0.18	42	0.86
Banks <i>et al</i> (2010)	Reino Unido	≈12.4	≈0.143	≈93	≈2.99
Hajovsky <i>et al</i> (2013)	República Checa	10.6	0.15	120	2.1
Wang <i>et al</i> (2013)	Australia	17-18	0.6	16.1	3.75-4.99
Murphy <i>et al</i> (2014)	E. U. A	≈10	0.61	15.2	2-2.3

Loveridge <i>et al</i> (2014)	Reino Unido	17.7	0.3	26	2.4-2.9
You <i>et al</i> (2014)	China	≈16	0.42	18	2.38-2.78
Bandeira Neto (2015)	Brasil	≈24.5	0.25-0.5	12	2.8-4.2
Soldo <i>et al</i> (2015)	Croacia	≈15	0.152	100	1.92
Soriano <i>et al</i> (2015)	Ecuador	–	0.113	50	1.310-1.312
Chang y Kim (2015)	República de Corea	15.2-15.6	0.150	150	2.20-3.03

Conceptualmente existe una analogía entre la ejecución de pruebas de bombeo y los ensayos de respuesta térmica. Ambas pruebas consisten en la perforación de un pozo a través del cual se perturba el sistema (suelo) y la posterior medición de su respuesta en el tiempo (Raymond *et al.*, 2011). En las pruebas de bombeo convencionales se extrae agua de un pozo y se mide la evolución del nivel piezométrico en él y en pozos cercanos (pozos de observación). En el ensayo de respuesta térmica se inyecta (o extrae) energía calorífica al suelo a través de una tubería en bucle por la que circula un fluido transmisor de calor (intercambiador de calor como el agua) y se monitorean las temperaturas de entrada y de salida del fluido durante un período de varios días. En la Figura 2.9 se presenta una comparación esquemática entre las pruebas.

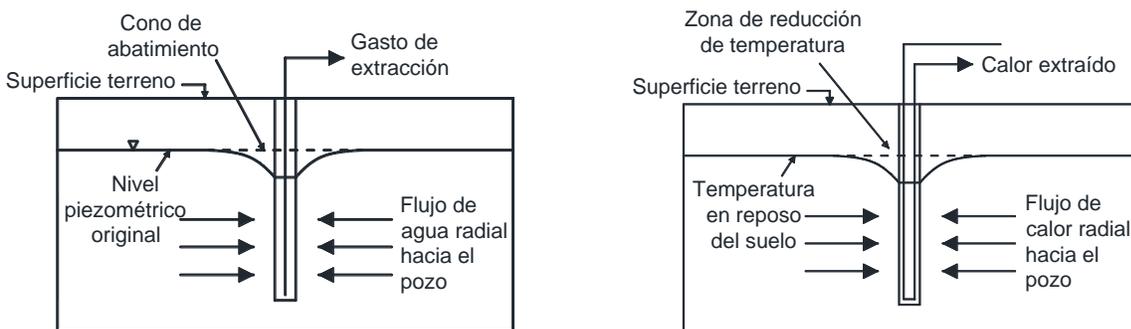


Figura 2.9. Comparación esquemática entre: a) prueba de bombeo sin pozos de observación, b) ensayo de respuesta térmica de extracción de calor (adaptado de Banks, 2012).

2.4.2. Equipo

El ensayo de respuesta térmica es una herramienta que permite determinar las propiedades térmicas de pozos intercambiadores de calor del suelo. Durante la prueba, el calor se inyecta o se extrae del suelo, y las temperaturas del fluido en circulación se miden a la entrada y salida del sistema (Chang y Kim, 2016).

De acuerdo con Kamarad, (2012) los componentes del circuito de funcionamiento interno de un equipo estándar de respuesta térmica se divide en tres categorías (Figura 2.10).

Primero, los dispositivos de trabajo: que incluyen un calentador eléctrico y una bomba de circulación hidráulica. Estos dos elementos se utilizan para generar la potencia de calentamiento que se inyecta al pozo. En segundo lugar, los dispositivos de medición para la adquisición de datos: medidor de flujo, sensores de temperatura de entrada y salida, sensores de presión. Estos elementos permiten determinar la presión de trabajo y seguir los cambios de temperatura a lo largo del tiempo. Finalmente, se encuentran los componentes hidráulicos constituidos por las válvulas, para abrir, cerrar o drenar el equipo; un tanque abierto para eliminar el aire del sistema y llenarlo con el fluido circulante y conexiones a las tuberías de perforación.

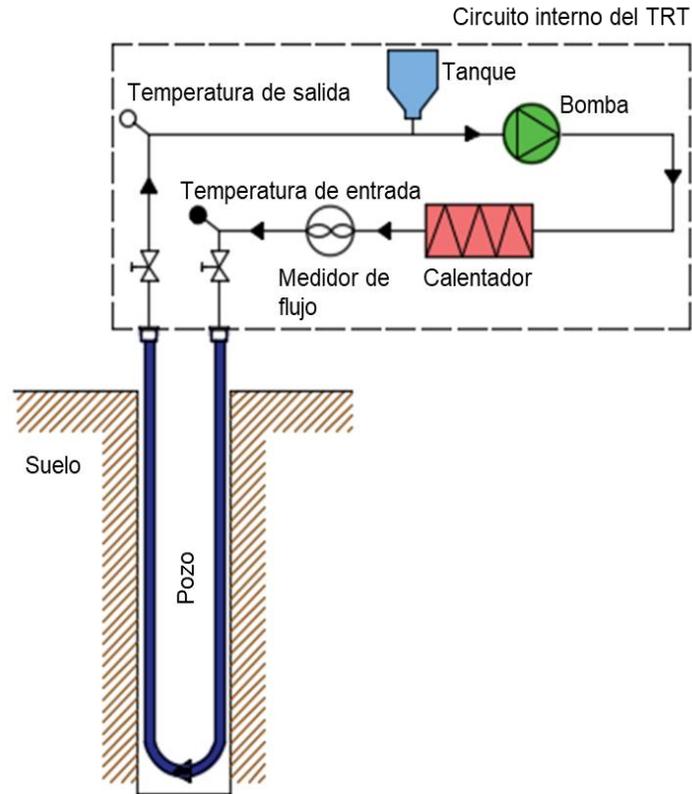


Figura 2.10. Esquema de un equipo TRT estándar (adaptado de Kamarad, 2012).

La construcción de un equipo de respuesta térmica debe satisfacer las recomendaciones señaladas en *“The Guidelines for thermal response testing”* presentadas en el Annex 21 de *“The Implementing Agreement of Energy Conservation through Energy Storage of the International Energy Agency (IEA)”*. En la Tabla 2.4 se resumen las principales características para la construcción de un equipo TRT. En términos de equipamiento, el calentador debe suministrar un caudal térmico constante. El caudal hidráulico debe ser turbulento todo el tiempo y debe ajustarse por medio de una bomba. También se deben instalar dispositivos de seguridad para controlar la presión, las fugas de fluido y para evitar el sobrecalentamiento. Las tuberías de conexión deben ser lo más cortas posibles para evitar fluctuaciones en los registros (Kamarad, 2012).

Tabla 2.4. Consideraciones generales de los principales componentes de un equipo TRT.

Dispositivo	Descripción
Bomba de circulación	Debe permitir la regulación de la cantidad de agua en circulación dentro del sistema. Se recomienda una bomba controlada.
Dispositivo de calentamiento	Debe permitir inyectar al sistema una potencia térmica constante de calentamiento.
Sistema de adquisición de datos	Se debe tener un registro y monitoreo durante todo el ensayo. El dispositivo de adquisición de datos debe incluir un lenguaje de programación que permita adquirir las señales de campo para traducirlas en lecturas de temperatura, presión y caudal.
Sensores para medir caudal, presión y temperatura	Medidor de caudal. Se recomienda usar medidores de flujo tipo turbina cuya precisión de medición es de aproximadamente $\pm 2 - \pm 5\%$. El uso de medidores de flujo ultrasónicos se recomienda cuando se requiere una estricta precisión.
	Sensores de temperatura. Se recomiendan sensores de resistencia de platino, conocidos comúnmente como Pt100 con una resistencia de 100Ω a 0°C .
	Medidor de presión. Se coloca como dispositivo de seguridad para controlar la presión.
Aditamentos para funcionamiento hidráulico	Están constituidos por las válvulas para abrir y cerrar el sistema, así como, del tanque de almacenamiento que ayuda a compensar las variaciones de flujo que se pueden presentar durante la ejecución del ensayo.

2.4.3. Montaje

El equipo de respuesta térmica se lleva a campo y se coloca a menos de un metro de distancia del pozo de ensayo o pozo de prueba, donde las tuberías que quedan expuestas a la intemperie deben cubrirse con un aislante térmico, por ejemplo, polietileno expandido que ayuda a evitar intercambios con el medio ambiente.

La perforación del pozo de ensayo se realiza una vez que se conoce la geología del sitio. Se debe utilizar el equipo adecuado para la perforación que garantice obtener el diámetro requerido, la profundidad y estabilidad necesaria para la prueba. La estabilización de la pared de la perforación se logra colocando un material de relleno que permite garantizar la transferencia de calor entre el suelo circundante y la tubería, se recomienda usar materiales de relleno a base de mezclas de agua, arena, bentonita y/o cemento. La conductividad

térmica del material de relleno debe ser superior a $1.30 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ (GSHP, 2011) o inclusive mayor que $2 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ (ISO 17628, 2015). Las mezclas para relleno se agrupan típicamente en lechadas cuyos componentes primarios son bentonita o cemento. Ambos materiales permiten obtener mezclas flexibles, de baja permeabilidad y de fácil colocación, aunque con una conductividad térmica baja con un rango entre 0.65 y $0.90 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ para las lechadas de bentonita (Kim *et al.*, 2015) y entre 0.80 y $0.85 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ para las lechadas de cemento (Allan y Kavanaugh, 1999). Diversos autores han estudiado la inclusión de otros materiales para mejorar las propiedades térmicas de las lechadas, tales como arena sílica, virutas de aluminio, carburo de silicio y grafito (Remund y Lund 1993, Allan y Kavanaugh 1999, Lee *et al.* 2010, Delaleux *et al.* 2012, Blásquez *et al.* 2017). En particular, la arena sílica y el grafito han demostrado ser alternativas viables a nivel mundial para mejorar la conductividad térmica de las lechadas (Sanner, 2003).

La tubería o sonda geotérmica debe tener la calidad de un tubo PE 100 negro. La instalación de la sonda geotérmica de acuerdo con la Norma ISO 17628 debe cumplir con cierta separación para evitar el choque térmico. La distancia mínima entre los separadores debe ser de, al menos 2 m. Después de concluida la instalación de la tubería se recomienda realizar un ensayo de funcionamiento con los tubos llenos de agua para verificar que la tubería no fue dañada durante la instalación. La tubería expuesta debe estar aislada térmicamente para que no existan influencias ambientales que afecten los resultados de la prueba, asimismo, la longitud de las tuberías al equipo TRT debe ser lo más corta posible.

2.4.4. Procedimiento de ensayo

Al principio, se debe verificar la instalación de todo el equipo de respuesta térmica. La prueba se debe iniciar 5 días después de rellenar el espacio anular de la perforación y una vez que las perturbaciones térmicas se hayan disipado (ISO, 17628). No se deben realizar perforaciones en un radio de diez metros días antes del ensayo.

Antes de comenzar se mide la temperatura inicial del suelo. El método más utilizado consiste en hacer circular el fluido portador de calor a través de la tubería durante aproximadamente 30 minutos. Los datos de temperatura obtenidos se utilizan para estimar la temperatura promedio de la perforación. El segundo método se basa en la colocación de un sensor de temperatura a lo largo de la tubería llena de agua; antes de que comience el ensayo se mide la temperatura aproximadamente cada dos metros en toda la profundidad del tubo. Los valores de temperatura obtenidos se utilizan para calcular una temperatura media aritmética del pozo (Gehlin, 2002).

El ensayo comienza una vez que se pone en marcha la bomba de circulación y se ha encendido el calentador. Se deben registrar los datos de temperatura a la entrada y a la salida del sistema en función del tiempo. La potencia por unidad de longitud suministrada a la tubería deber estar comprendida entre 40 W m^{-1} y 80 W m^{-1} .

El ensayo se efectúa bajo una tasa de flujo constante durante un periodo mínimo de 48 horas. La duración definitiva del ensayo depende de:

- Dimensiones del pozo de prueba (diámetro de la perforación, material de relleno del espacio anular, etc.),
- Constancia de calentamiento y enfriamiento

La duración mínima del ensayo puede calcularse con la ecuación 2.22

$$t_1 = \frac{5r_0^2}{D} \quad (2.22)$$

donde r_0 es el diámetro del pozo, D es la difusividad térmica del suelo.

El tiempo mínimo de prueba recomendado es de aproximadamente 60 horas (Gehlin, 1998); lo que permite que el flujo de calor se estabilice en el suelo. Autores como Smith y Perry (1999) proponen un tiempo conservador de 12 a 20 horas, suficientes para una baja estimación de la conductividad térmica pero que evita que el equipo de prueba se quede toda la noche en el sitio de estudio.

De acuerdo con las características térmicas del sitio de interés, las primeras lecturas de temperatura del ensayo deben descartarse, ya que la transferencia de calor en este período está dominada por el efecto transitorio (Bandeira Neto, 2015). El período de eliminación varía según diversos autores, Austin (1995) recomienda que sean descartadas las primeras 12 horas, mientras que Gehlin (2002), recomienda que se descarten entre las 12 y 20 horas iniciales.

2.4.5. Resistencia térmica del pozo de prueba

La resistencia térmica total de la pared del pozo de ensayo o pozo de prueba depende de varios parámetros involucrados tales como la distancia entre el fluido en las tuberías y la pared del pozo y las propiedades térmicas del material de relleno.

Los pozos intercambiadores de calor se componen de tres partes generales: a) fluido portador de calor, b) tubería del pozo, y c) material de relleno. Por lo tanto, la resistencia térmica del pozo R_b , está asociada a estos tres componentes, como se observa de manera desglosada en la Figura 2.11 (Acuña, 2010).

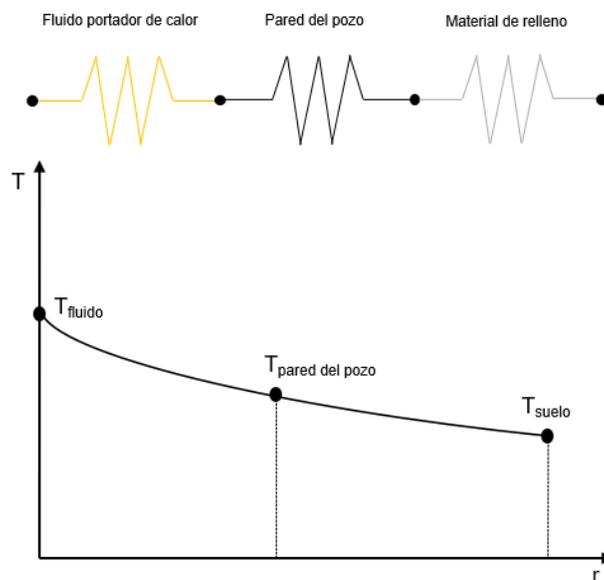


Figura 2.11. Componentes de la resistencia térmica de un pozo intercambiador de calor (adaptado de Acuña, 2010).

El calor comienza a transferirse a través de tres resistencias térmicas entre la pared del pozo y el fluido portador de calor, cada una de ellas representa cierta variación de la carga térmica. El fenómeno de convección se produce a través del del fluido intercambiador de calor hacia las tuberías, mientras que la conducción ocurre a través de las paredes de la tubería y a través del material de relleno hasta el suelo (Loveridge, 2012).

2.4.6. Variación de la temperatura del suelo

El conocimiento de la temperatura del suelo no perturbado es fundamental para el diseño de sistemas cerrados de BCG, pues ayuda a la determinación de la profundidad a que deben colocarse las tuberías de servicio para satisfacer la demanda de calefacción y enfriamiento de las edificaciones

De acuerdo con Ericsson (1985) y Sanner (1986) la temperatura del suelo inalterado aumenta con la profundidad debido al gradiente térmico. La temperatura del suelo se ve afectada por factores meteorológicos. La radiación solar y la temperatura del aire influyen en la temperatura de la superficie y del subsuelo, al afectar la velocidad a la que se intercambia calor entre la atmosfera y el suelo. La radiación solar es el factor más importante. Los cambios estacionales y diarios en la radiación solar imponen una variación cíclica tanto en la temperatura del aire como en la temperatura de la superficie del suelo. El viento y la lluvia provocan variaciones locales importantes. Por su parte la vegetación aporta un efecto aislante que protege al suelo de los fenómenos meteorológicos extremos que provocan altas tasas de transferencia de calor hacia y desde la atmósfera (Florides y Kalogirou, 2005).

El perfil de temperatura del suelo puede determinarse antes de un ensayo de respuesta térmica (TRT) o bien idealizarse a partir de una función sinusoidal:

$$T(z, t) = T_m + A_0 e^{-\frac{z}{d}} \left[\text{sen} \left(\omega t - \frac{z}{d} \right) \right] \quad (2.23)$$

donde T_m es la temperatura media anual; A_0 es la amplitud máxima anual en la superficie, ω es la frecuencia radial anual ($2\pi/365$ suponiendo que t está dado en días). El factor d cuantifica el amortiguamiento de la fluctuación anual y es función de la difusividad térmica del suelo D y de ω (Barba Galdámez, 2018):

$$d = \left(\frac{2D}{\omega} \right)^{1/2} \quad (2.24)$$

La Ecuación (2.23) indica que la fluctuación de la temperatura disminuye con la profundidad. La variación estacional de la temperatura del suelo tiene gran influencia hasta aproximadamente 5 m de profundidad, posteriormente después de los 10 m de profundidad la temperatura del suelo se vuelve constante e igual a la temperatura ambiente media anual de la zona. Asimismo, la temperatura de la superficie se vuelve constante cerca de la temperatura media del suelo a una profundidad mayor que 10 m, como se observa en la Figura 2.12.

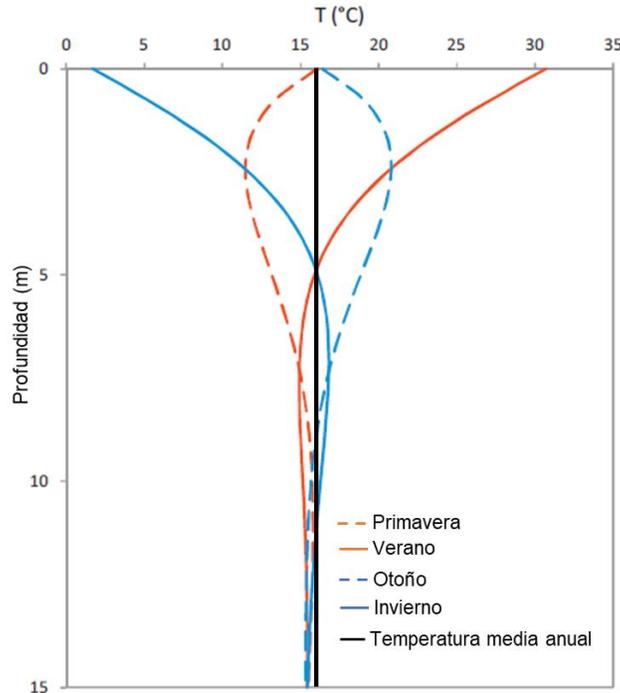


Figura 2.12. Fluctuación de la temperatura inicial del suelo (adaptado de Suryatriyastuti *et al.*, 2012).

2.5. Teorías y modelos matemáticos para la evaluación de un ensayo TRT

Los resultados obtenidos de un ensayo TRT pueden interpretarse con modelos analíticos simples de transferencia de calor, como el modelo de fuente lineal infinita, el modelo de fuente cilíndrica infinita y el modelo de fuente lineal finita. Cada uno de estos modelos asume un medio, homogéneo e isótropo además se hacen suposiciones respecto a la geometría del pozo, ya que se puede asumir como una fuente lineal de calor o un medio infinitamente largo (Jensen-Page *et al.*, 2019).

2.5.1. Modelos analíticos

(a) Modelo de fuente lineal infinita

El modelo de fuente lineal e infinita es uno de los métodos más empleados para la evaluación de las propiedades térmicas del suelo, debido a su simplicidad. Ingersoll y Plass (1948) aplicaron este modelo al diseño de pozos con bombas de calor geotérmico. Mogensen (1983) mejoró este modelo para estimar la conductividad térmica del suelo a partir de una prueba de campo experimental (Gehlin, 2002). Carslaw y Jaeger (1959) proporcionaron la solución teórica aproximada de un campo de temperatura que está en función del tiempo t y del radio r , alrededor de una fuente lineal con una tasa de inyección de calor constante, \dot{Q} .

$$Tf(t) = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H} \ln(t) + \left[\frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4D}{r_b^2}\right) - \gamma \right) + R_b \right] + T_0 \quad (2.25)$$

donde $T_f(t)$ es la temperatura media del fluido portador de calor (K), \dot{Q} es la tasa de transferencia de calor inyectado (W), λ es la conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), H es la longitud del pozo (m), D es la difusividad térmica ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), r_b es el radio del pozo (m), γ es la constante de Euler (0.5772), R_b es la resistencia térmica del pozo ($\text{K W}^{-1} \text{m}$) y T_0 es la temperatura inicial del suelo (K).

La Ecuación (2.25) es una simplificación de la solución analítica completa de la ecuación que se aplica a una fuente de calor infinitamente delgada en un medio homogéneo e isótropo. La ecuación en su forma completa se expresa como (Gehlin, 2002):

$$T_f(t) = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r_b^2}{4Dt}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \cong \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda} E_i\left(\frac{r_b^2}{4Dt}\right) \quad (2.26)$$

donde E_i se conoce como integral exponencial y solamente es válida cuando at/r_b^2 es suficientemente pequeño. La relación $at/r_b^2 = F_0 = 5$ y se considera como el tiempo mínimo para la aplicación de la Ecuación (2.25), donde F_0 es el número de Fourier. Generalmente, se hace asume que el pozo intercambiador de calor se encuentra en estado térmico estable y se asegura que el valor de la resistencia térmica del pozo es constante (Loveridge y Powrie, 2013).

Ingersoll y Plass (1948) demostraron que la Ecuación (2.26) se puede utilizar con un error de menor que 2% si $t > 20r_b^2/\alpha$, equivalente a un rango de 10 a 20 horas (Kamarad, 2012).

Por lo tanto, según la Ecuación (2.25) la temperatura media del fluido portador de calor depende únicamente del logaritmo natural del tiempo y considerando que la tasa de inyección de calor es constante la ecuación puede reducirse a una forma lineal más simple:

$$T_f(t) = k \ln(t) + m \quad (2.27)$$

donde m y k son constantes.

La conductividad térmica λ , está relacionada con la pendiente k de la línea resultante al trazar la temperatura media del fluido T_f , contra el logaritmo natural del tiempo, $\ln(t)$ y se obtiene con la siguiente ecuación, dada por Eklöf y Gehlin (1996):

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4\pi k H} \quad (2.28)$$

Esen e Inalli (2009):

$$m = \frac{\dot{Q}}{H} \left[\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4D}{r_b^2}\right) - \gamma \right) - R_b \right] + T_0 \quad (2.29)$$

La resistencia térmica del pozo puede ser constante o dependiente del tiempo (Kamarad, 2012):

$$R_b = \frac{T_f(t) - T_0}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4Dt}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (2.30)$$

$$R_b = \frac{m - T_0}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4Dt}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (2.31)$$

donde D es la difusividad térmica, definida como $D = \lambda/c_{cv}$ (ρc_{ce} es la capacidad térmica volumétrica ($J m^{-3} K^{-1}$)).

(b) Modelo de fuente cilíndrica hueca infinita

El modelo matemático de fuente cilíndrica hueca infinita fue desarrollado por Ingersoll *et al.*, (1948) e implementado por primera vez por Carslaw y Jaeger (1959) a partir de soluciones analíticas con condiciones de contorno variables para regiones limitadas por la geometría del terreno. El modelo asume que el pozo intercambiador de calor actúa como un cilindro hueco desde el cual todo el calor fluye hacia afuera.

La solución analítica a la ecuación de conducción de calor está dada por la Ecuación (2.32) (Austin, 1998):

$$\Delta T_g = T_{ff} - T_{r0} = \frac{q_{gc}}{\lambda H} G(z, p) \quad (2.32)$$

donde T_{ff} es la temperatura en el medio distante, T_{r0} es la temperatura en la pared del cilindro, q_{gc} es el flujo de calor, λ es la conductividad térmica del suelo, H es la longitud del cilindro, $G(z, p)$ es la función de fuente cilíndrica descrita por Ingersoll *et al.* (1954):

$$G(z, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 z} - 1}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} [J_0(p\beta)Y_1(\beta) - Y_0(p\beta)J_1(\beta)] d\beta / \beta^2 \quad (2.33)$$

J_0, J_1, Y_0, Y_1 Funciones de Bessel del primer y segundo orden

Con el fin de adaptar el modelo de fuente cilíndrica hueca infinita a un pozo con una configuración de tubería con arreglo en "U", se sugirió un diámetro equivalente para corregir este error. El diámetro de la tubería se puede representar mediante una aproximación de un diámetro equivalente de acuerdo con siguiente ecuación (Bose, 1984):

$$D_{equivalente} = \sqrt{2D_0} \quad (2.34)$$

Esta equivalencia de diámetro de la Ecuación 2.34 produce una tubería de un sólo diámetro, que se aproxima a la transferencia de calor de dos tuberías en un pozo cilíndrico. Los dos tubos se representan como un único cilindro con diámetro equivalente (Austin, 1998).

La resistencia térmica del pozo está dada por la resistencia de la conductividad de la pared de la tubería y la resistencia a la convección debido al movimiento del fluido dentro de la tubería. Se puede representar con la Ecuación (2.35):

$$R_b = \frac{r_0 \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)}{2k_p} \quad (2.35)$$

donde k_p es la conductividad de la tubería.

La resistencia a la convección está dada por:

$$R_c = \frac{1}{h_i \frac{r_i}{r_0}} \quad (2.36)$$

El coeficiente de convección h_i para flujo turbulento, se determina como:

$$h_i = Nu_{Di} \frac{k_w}{D_i} \quad (2.37)$$

El número de Nusselt (Nu) fue definido por Dittus (1930) en función del número de Reynolds y del número de Prandtl. La ecuación de Nusselt está dada por:

$$Nu_{Di} = 0.023 Re_{Di}^{4/5} Pr^n \quad (2.38)$$

El coeficiente de potencia de Prandtl depende de la dirección del campo de temperatura. Se determina la resistencia equivalente del pozo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$h_{eq} = \frac{1}{R_b + R_c} \quad (2.39)$$

La diferencia de temperatura entre la pared exterior del cilindro y el fluido dentro de la tubería se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\Delta T_p = \frac{q_{gc}}{C_t N_t h_{eq} A_c} \quad (2.40)$$

donde A_0 es el área de la superficie del cilindro en contacto, $C = 0.85$ es el coeficiente relacionado con el uso de la tubería en bucle, N_t es el número de tuberías.

Por lo tanto, la temperatura promedio del agua para el cálculo de la conductividad térmica se determina como:

$$T_{promedio} = T_{ff} + \Delta T_g + \Delta T_p \quad (2.41)$$

El modelo de la fuente cilíndrica tiende a ser más complejo y no toma en cuenta las propiedades térmicas de la lechada o relleno y la solución depende del criterio del usuario para determinar la mejor aproximación (Austin, 1998).

(c) Modelo de fuente lineal finita

El modelo de fuente lineal finita es una solución analítica al modelo de Eskilson presentado por primera vez por Zeng *et al.* (2002). Este modelo considera que el suelo es un medio semi-infinito y homogéneo con una temperatura inicial uniforme, las propiedades termofísicas son constantes con los cambios de temperatura. El límite del medio que representa la superficie del suelo mantiene una temperatura constante durante los cálculos (Oravec *et al.*, 2020). Este modelo también ignora la dimensión radial del pozo intercambiador de calor.

Jensen-Page *et al.* (2019) proporcionaron una solución simplificada del modelo que determina la temperatura media a lo largo del pozo intercambiador de calor:

$$T_f(t, z) = T_0 + \frac{Q}{H} R_b + \frac{Q}{2H\lambda\pi} \left[\int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \frac{erfc(\omega\beta)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_A - \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \frac{erfc(\omega\beta)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_B \right] \quad (2.42)$$

donde $\beta = r_b/H$, $\omega = H/\sqrt{4\alpha t}$ y $erfc$ es la función de error. Las expresiones analíticas D_A y D_B se definen como:

$$D_A = \sqrt{\beta^2 + 1} erfc(\omega\sqrt{\beta^2 + 1}) - \beta erfc(\omega\beta) - \left(\frac{e^{-\omega^2(\beta^2+1)} - e^{-\omega^2\beta^2}}{\omega\sqrt{\pi}} \right) \quad (2.43)$$

$$D_B = \sqrt{\beta^2 + 1} erfc(\omega\sqrt{\beta^2 + 1}) - 0.5 \left(\beta erfc(\omega\beta) + \sqrt{\beta^2 + 4} erfc(\omega\sqrt{\beta^2 + 4}) \right) - \left(\frac{e^{-\omega^2(\beta^2+1)} - 0.5(e^{-\omega^2\beta^2} + e^{-\omega^2(\beta^2+4)})}{\omega\sqrt{\pi}} \right) \quad (2.44)$$

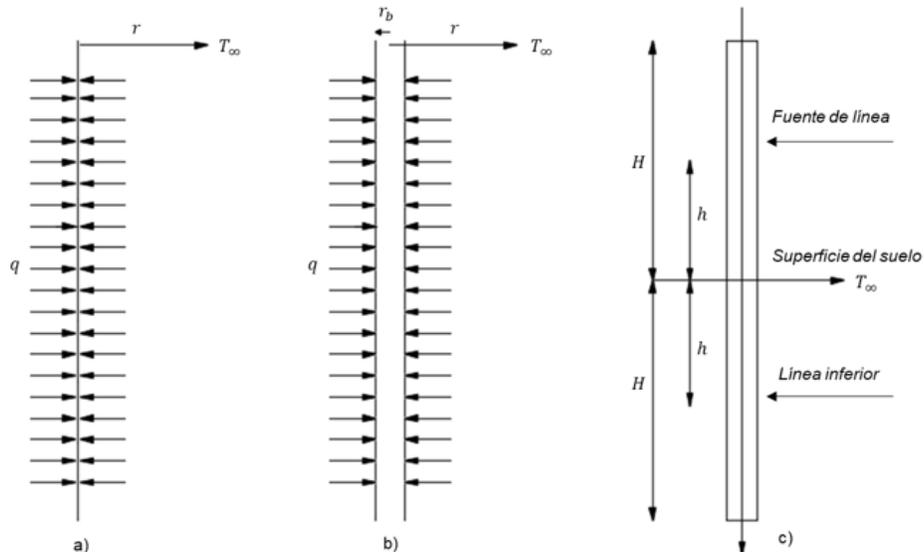
(d) Funciones G

Las funciones G fueron presentadas por primera vez por Eskilson (1987) y representan el cambio de temperatura normalizada (Φ) del suelo en el borde de un pozo intercambiador de calor como una función del número de Fourier resultante de un flujo de calor constante, q . Las funciones G suponen que la temperatura inicial del suelo es la misma en todas partes y que la superficie del suelo y las condiciones del campo lejano tienen una temperatura constante igual al valor inicial. Generalmente, las funciones G se expresan de forma adimensional como (Loveridge *et al.*, 2020):

$$\Phi = G_g(F_0, r^*) \quad (2.45)$$

donde Φ es la respuesta de temperatura dimensional, $\Phi = \frac{2\pi\lambda}{q} \Delta T$, F_0 es el número de Fourier o tiempo adimensional definido como $F_0 = Dt/r_b^2$, D es la difusividad térmica del suelo, y r_b es el radio de la pila, r^* es un factor de geometría adimensional, expresado como coordenada radial dividida por la longitud del pozo intercambiador de calor. Las funciones G tienen soluciones analíticas similares al modelo de fuente lineal infinita, modelo de fuente cilíndrica hueca infinita y al modelo de fuente lineal finita.

Las configuraciones geométricas utilizadas se presentan esquemáticamente en la Figura 2.13. Desafortunadamente los modelos analíticos simples no toman en cuenta la geometría del pozo, la disposición de las tuberías y no permiten caracterizar el comportamiento térmico inicial (Loveridge y Powrie, 2013). Estas funciones tienden a subestimar el cambio de temperatura en pilas de mayor diámetro en escalas más pequeñas de tiempo. Debido al gran número de variables que afectan el rendimiento de un pozo intercambiador de calor, no ha sido posible desarrollar una única función G universal.



Nota: T_{∞} = temperatura del campo lejano; H = longitud del pozo intercambiador de calor; h = profundidad debajo de la superficie del suelo.

Figura 2.13. Esquemas de los modelos clásicos de funciones G: a) Fuente lineal infinita, b) Modelo de fuente cilíndrica hueca infinita, c) Fuente lineal finita. (adaptado de Loveridge *et al.*, 2020).

Los modelos convencionales para la determinación de las propiedades térmicas en pilas de energía requieren de un mayor tiempo de duración del ensayo ya que el criterio para descartar los primeros datos de prueba depende del diámetro del pilote. A medida que las pruebas se alargan en tiempo, los efectos tridimensionales se vuelven importantes y es posible que los modelos simples de fuente de calor infinita u otros modelos numéricos de 1D y 2D ya no resulten apropiados (Loveridge *et al.*, 2014).

Autores como Loveridge y Powrie (2013) han presentado nuevos modelos empíricos denominados funciones G, que toman en cuenta el almacenamiento de calor transitorio dentro de la pila y son aplicables para una amplia gama de escalas de tiempo, además simulan el comportamiento térmico de los intercambiadores de calor. Pueden utilizarse para

analizar los datos obtenidos en los ensayos de respuesta térmica. Estos modelos pueden utilizarse en pruebas de corta duración en las que el análisis de flujo de calor se realiza en condiciones transitorias.

Las funciones G (G_c y G_g) permiten simular la variación de la resistencia térmica del medio (concreto o suelo) con el tiempo. El ajuste del cambio de temperatura medio del fluido (ΔT_f) a un modelo analítico se realiza con las siguientes expresiones (Loveridge y Powrie, 2013):

$$\Delta T_f(t) = qR(t) \quad (2.46)$$

$$\Delta T_f(t) = qR_p + qR_c G_c + \frac{q}{2\pi\lambda_g} G_g \quad (2.47)$$

donde R_p es la resistencia térmica de la tubería, R_c es la resistencia térmica del concreto, G_c es la función G del concreto y G_g la función G de la pila de energía.

La resistencia térmica de la perforación R_b se obtiene como:

$$R_b = R_p + R_c \quad (2.48)$$

donde:

$$R_p = \frac{1}{2n\pi r_i h_i} \quad (2.49)$$

y

$$R_c = \frac{\ln(r_0/r_i)}{2n\pi\lambda_{tubería}} \quad (2.50)$$

donde n es el número de tuberías dentro de la sección transversal del intercambiador de calor, r_i es el radio interno de la tubería, r_0 es el radio externo de la tubería, $\lambda_{tubería}$ es la conductividad térmica de la tubería y h_i es el coeficiente de transferencia de calor que se puede calcular utilizando la correlación de Gnielinski (1976) asumiendo un flujo turbulento.

Las dos funciones G toman la forma de la Ecuación (2.47), donde a y h dependen de la geometría de la pila de energía, tanto en términos de las posiciones de la tubería como de la relación de aspecto, $AH=H/2r_b$.

$$G = a[\ln(Fo)]^7 + b[\ln(Fo)]^6 + c[\ln(Fo)]^5 + d[\ln(Fo)]^4 + e[\ln(Fo)]^3 + f[\ln(Fo)]^2 + g[\ln(Fo)] + h \quad (2.51)$$

Esta función puede determinarse empleando una hoja de cálculo o un programa especializado.

2.5.2. Modelos numéricos

Los modelos numéricos están diseñados para representar de manera más detallada y realista la geometría del pozo, las propiedades térmicas del flujo transportador de calor, la separación entre tuberías, las propiedades térmicas y volumétricas del material de relleno, así como, la transferencia de calor durante la prueba. Factores que, con los modelos analíticos convencionales no pueden considerarse (Gehlin y Hellström, 2000), por esta razón se han desarrollado modelos numéricos unidimensionales (1D) que ayudan a resolver ecuaciones de transferencia de calor. También existen modelos de diferencias finitas y modelos de elementos finitos en 2D y 3D.

Los resultados del ensayo de respuesta térmica pueden evaluarse con diferentes modelos analíticos (ya sea con el modelo de fuente lineal, o el modelo de fuente cilíndrica) y distintos modelos numéricos. Sin embargo, los enfoques alrededor del mundo pueden variar. En los países europeos se analizan la conductividad térmica del suelo y la resistencia térmica entre el fluido intercambiador de calor y la pared del pozo, mientras que los modelos estadounidenses analizan la conductividad térmica del suelo y la conductividad térmica del material de relleno.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO TRT-IIUNAM

3.1. Descripción del equipo de respuesta térmica implementado (TRT-IIUNAM)

Como parte de un proyecto de investigación del Instituto de Ingeniería para la determinación de las propiedades térmicas de los suelos mexicanos, se diseñó, construyó, calibró y puso en marcha un equipo de respuesta térmica (TRT). Con base en lo expuesto en el Inciso 2.4.1., el equipo consta de tres bloques característicos de funcionamiento interno: a) los dispositivos de trabajo, b) los dispositivos de medición para la adquisición de datos, y c) los componentes hidráulicos.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques esquemático del equipo TRT-IIUNAM implementado en el Instituto de Ingeniería, para medir la respuesta térmica de los suelos en campo.

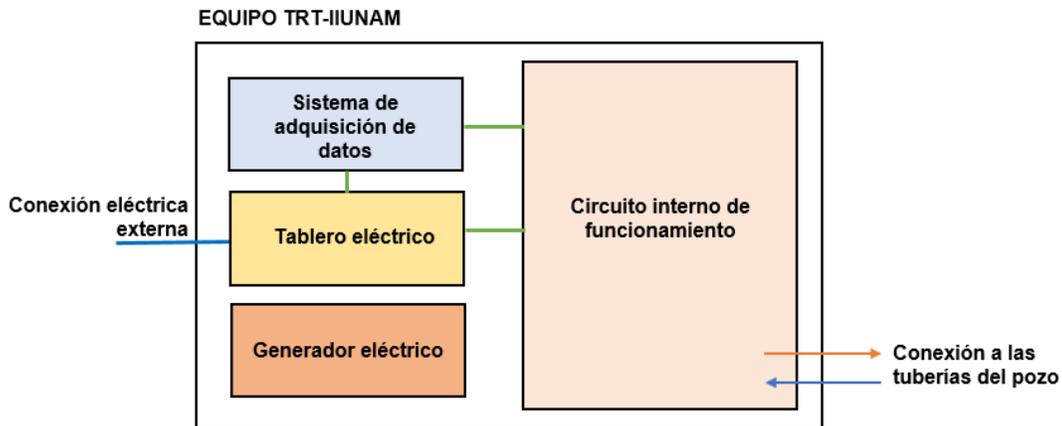


Figura 3.1. Diagrama de bloques del equipo TRT-IIUNAM.

En el caso particular del equipo TRT-IIUNAM del Instituto de Ingeniería todos los componentes fueron colocados dentro de un remolque cerrado de un sólo eje, con base antiderrapante. El remolque contiene todos los elementos necesarios para su uso en campo, ya que alberga una tubería de polipropileno (PP-R) de 3/4" de diámetro nominal, dispositivos de trabajo que incluyen un calentador eléctrico y una bomba de agua, dispositivos de medición que constan de un medidor de flujo tipo turbina, sensores de temperatura Pt 100, transductores de presión y un monitor PLC para la adquisición de datos; los componentes hidráulicos están constituidos por válvulas de control para abrir, cerrar y purgar el sistema.

El circuito interno de funcionamiento está protegido contra los impactos ambientales, pues está cubierto en las cuatro direcciones con lámina de acero. Además, cuenta con dos puertas desmontables que permiten la manipulación directa de la instrumentación del equipo. Las puertas protegen el circuito interno y pueden cerrarse con llave para evitar posibles robos.

Una vez habilitada la primera versión del equipo TRT-IIUNAM, fueron necesarias algunas modificaciones al interior del remolque, para lograr mejores condiciones de trabajo. La primera modificación del remolque fue colocar en las paredes internas aislante térmico, que

3. Diseño y construcción del equipo TRT-IIUNAM

consta de una capa de aluminio 99% puro, dos capas de polietileno que forman una burbuja de aire encapsulado y una capa adicional de aluminio 99% puro. Otra modificación dentro del remolque, fue la colocación de un tablero eléctrico para la medición, control y protección de los diferentes circuitos que componen la parte eléctrica del equipo TRT-IIUNAM y que se discuten más adelante.

El equipo está diseñado para no requerir de energía eléctrica durante 12 horas continuas ya que cuenta con un generador eléctrico de 5000 Watts. Además, cuenta con un tanque de almacenamiento de agua de 20 litros. La Figura 3.2 muestra una vista isométrica del equipo móvil completo. La Figura 3.3 representa la vista en corte lateral trasera del equipo exterior del remolque. La condición original del remolque se modificó para colocar una rejilla de ventilación para el generador eléctrico y una tapa desmontable para tener acceso a la conexión de las tuberías de entrada y salida del sistema.

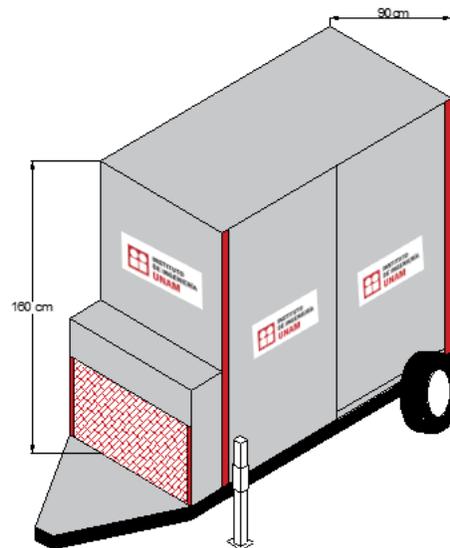


Figura 3.2. Vista isométrica del equipo móvil TRT-IIUNAM 2021.

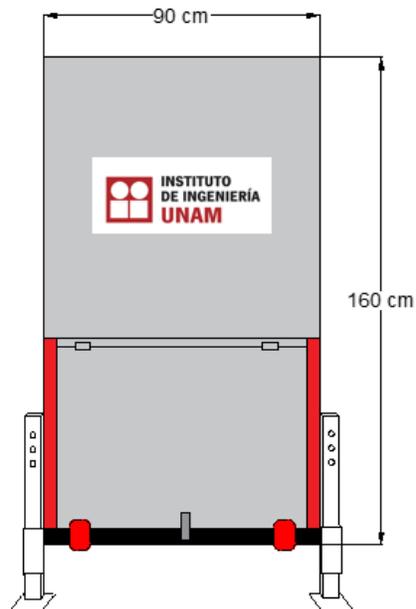


Figura 3.3. Vista en corte lateral trasera del equipo TRT-IIUNAM 2021.

3.2. Circuito interno de funcionamiento

El equipo de respuesta térmica diseñado e implementado en el Instituto de Ingeniería es el primer prototipo de su clase en México y se realizó bajo los términos de seguridad y control presentados en la Norma ISO-17628 y en los trabajos del *IEA ECES, Thermal Response Test (TRT) – Annex 21* (ECES, 2013).

El circuito interno de funcionamiento incluye los componentes que están en contacto con el fluido portador de calor. En la Figura 3.4 se presenta un diagrama ilustrativo del funcionamiento del equipo TRT-IIUNAM, así como, la dirección del fluido portador de calor dentro del sistema cuando se ejecuta el ensayo TRT.

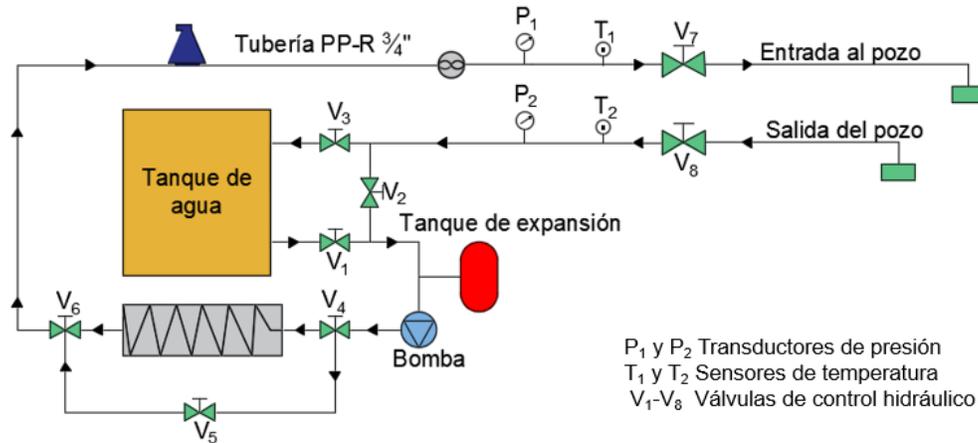


Figura 3.4. Diagrama ilustrativo del funcionamiento interno del equipo TRT-IIUNAM implementado (IIUNAM, 2021).

3.2.1. Componentes hidráulicos

(a) Suministro del fluido portador de calor

De acuerdo con las recomendaciones de la Norma ISO-17628 (2015) el fluido portador de calor debe satisfacer los requisitos de diseño del ensayo. Se recomienda utilizar agua potable debido a sus buenas propiedades hidrodinámicas y porque no pone en peligro el terreno y el agua subterránea, en caso de que exista fuga en la tubería del pozo de ensayo.

En caso de no existir disponibilidad de agua potable en el sitio de prueba, el equipo TRT-IIUNAM cuenta con un tanque de suministro de agua que se puede utilizar para llenar las tuberías del circuito interno de funcionamiento, así como, las tuberías del pozo.

(b) Tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento de agua es un bidón fabricado con polietileno de alta densidad. Tiene una base cuadrada de 28 cm con una altura de 57 cm, se cierra herméticamente con una tapa circular de 28 cm de diámetro. Es capaz de almacenar 20 litros de agua. El tanque tiene dos conexiones una de salida y una de retorno del agua que están conectadas directamente a la tubería del circuito interno de funcionamiento. El tanque de almacenamiento se ubica en la pared posterior del remolque. En la Figura 3.5 se muestra

la ubicación del tanque y las conexiones de salida y retorno del fluido portador de calor dentro del sistema.

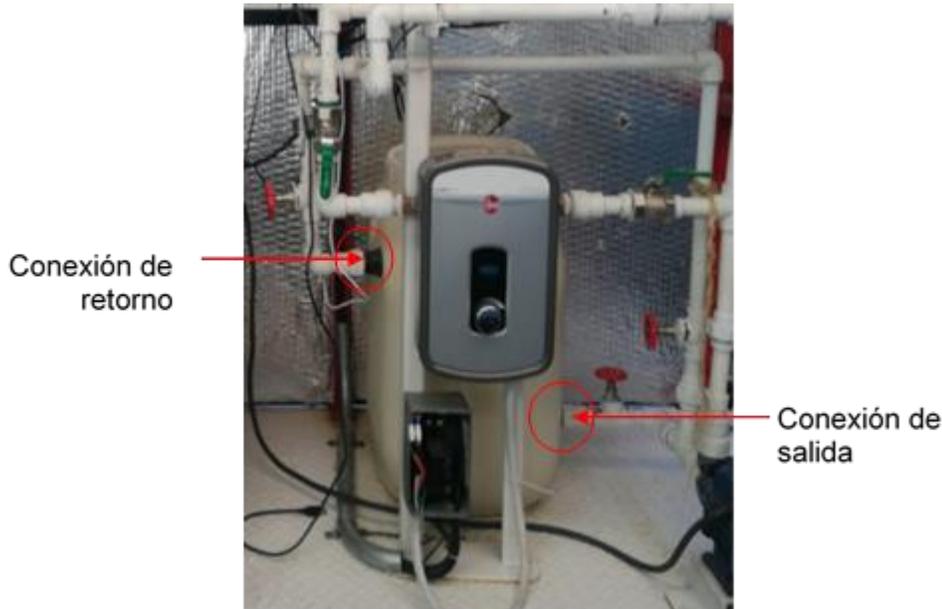


Figura 3.5. Ubicación del tanque de almacenamiento y conexiones.

La conexión de retorno de agua se ubica en la parte superior del tanque. Lo anterior, permite que al hacer circular el agua por todo el sistema se minimicen las burbujas de aire que se extraen de todo el circuito. La conexión de salida se ubica en la parte inferior del tanque, lo que permite que la bomba succione agua sin burbujas de aire. Esta misma conexión de salida tiene una ampliación que es una línea de drenaje que permite drenar el sistema en caso necesario. Las conexiones de retorno y salida tienen una válvula de esfera que permiten al operador controlar la cantidad de flujo y cerrar el sistema cuando sea necesario.

(c) Válvulas de control hidráulico

Las válvulas de control hidráulico permiten dirigir el flujo del agua de acuerdo con las necesidades de operación del equipo. Se utilizan tres tipos diferentes de válvulas: a) válvulas de globo, b) válvulas de esfera, y c) válvulas tipo check.

Las *válvulas de globo* son válvulas de movimiento lineal y están diseñadas para interrumpir o iniciar el flujo y regularlo. Dos de ellas están colocadas en las conexiones de retorno y salida del tanque de almacenamiento, la tercera está colocada de forma vertical para regular el flujo cuando el sistema se encuentra en circuito cerrado.

Las *válvulas de esfera* funcionan como llaves de paso entre el bypass del calentador cortan totalmente el flujo. El equipo cuenta con tres válvulas de esfera que permiten poner en funcionamiento del calentador eléctrico o solamente la circulación del agua sin tener que pasar por el calentador.

Las *válvulas tipo check* se ubican en las tuberías de entrada y de salida del sistema. Se utilizan para garantizar la dirección del flujo en un solo sentido. La ubicación de las válvulas permite que el sistema trabaje en circuito abierto o circuito cerrado.

En la Figura 2.6 se ilustra la ubicación de todas las válvulas descritas previamente, así como, la dirección del flujo dentro del sistema.

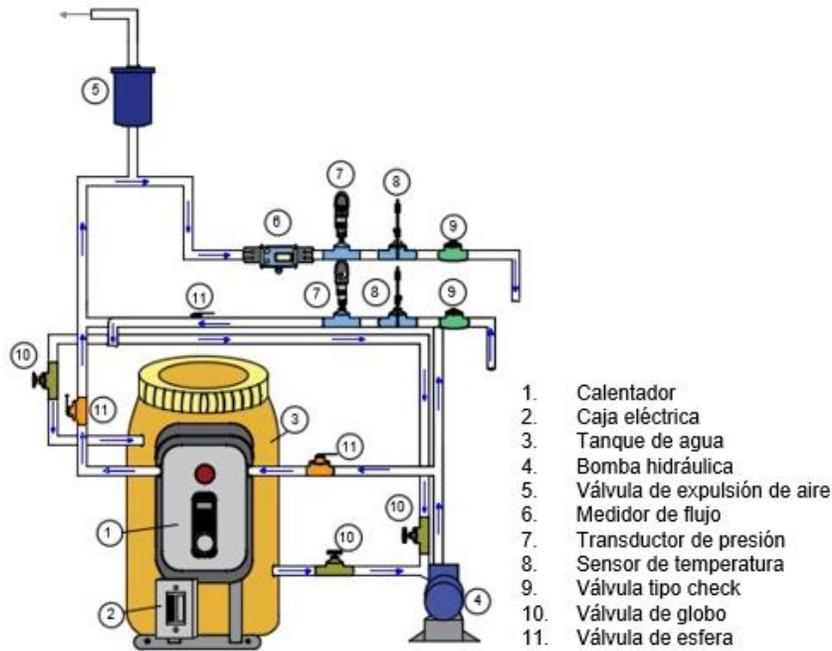


Figura 3.6. Sistema de funcionamiento del equipo TRT-IIUNAM con dirección de las líneas de flujo.

3.2.2. Dispositivos de trabajo

(a) Bomba de circulación hidráulica

Las características de la bomba hidráulica se definen considerando el tipo de flujo y la caída de presión máxima esperada durante la prueba TRT. El flujo debe ser turbulento para garantizar una mejor transferencia de calor al interior de las tuberías. El número de Reynolds (Re), permite analizar el estado del flujo de cualquier fluido en movimiento en las tuberías. Es un número adimensional que se puede calcular utilizando la Ecuación (3.1). Dependiendo del número de Reynolds, existen tres tipos de flujo: a) laminar ($Re \leq 2300$), b) transitorio ($2300 < Re \leq 4000$), y c) turbulento ($Re > 4000$) (Kamarad, 2012).

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (3.1)$$

donde V es la velocidad del fluido; D es el diámetro de la tubería; ν es la viscosidad cinemática del fluido (agua $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

La elección de la bomba hidráulica del equipo TRT-IIUNAM se realizó asumiendo una profundidad del pozo de 20 m, tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) clase 100 con un diámetro interno nominal de 19.05×2.3mm. El fluido portador de calor es agua potable. A partir de los valores conocidos y proponiendo una velocidad media del fluido de 0.5 m/s, se calcula el gasto hidráulico dentro del sistema.

$$Q = VA_t \quad (3.2)$$

donde V es la velocidad del fluido; A_t es el área de la tubería.

Conociendo el número de Reynolds, el factor de fricción f , se determina con la Ecuación (3.3) para $R_e > 2300$:

$$f = \frac{1}{(0.79 \ln R_e - 1.64)^2} \quad (3.3)$$

donde $R_e = 9525$; $f = 0.03191$.

La caída de presión dentro del pozo debida a la fricción se puede estimar con la fórmula modificada de Darcy-Weisbach que fue derivada de un análisis dimensional:

$$\Delta P_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \cdot \gamma_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad (3.4)$$

La determinación de la potencia de la bomba necesaria para elevar el flujo se calcula con la Ecuación (3.5).

$$P = \frac{Q_h H_i \gamma_{agua}}{\eta_b} \quad (3.5)$$

donde Q_h es el caudal hidráulico; H_i es la carga hidráulica total; γ_{agua} es el peso específico del agua; η_b es la eficiencia de la bomba.

(b) Calentador eléctrico

En el ensayo de respuesta térmica (TRT) la inyección de calor debe ser tan constante como sea posible. Por tal motivo, se debe garantizar una potencia de trabajo del calentador durante toda la prueba. De acuerdo con la especificación de la norma ISO-17628, la potencia por unidad de longitud suministrada a la tubería debe estar comprendida entre 40 W m^{-1} y 80 W m^{-1} , conociendo la profundidad de realización de la prueba se hace una estimación del caudal térmico (\dot{Q}) que debe suministrar la sonda geotérmica. Los caudales más bajos corresponden a las formaciones de más baja conductividad.

Para el ensayo de respuesta térmica de esta investigación, se considera una potencia máxima de 80 W m^{-1} para una profundidad del pozo de prueba de 20 m:

$$\dot{Q} = 20 \text{ m} \times 80 \text{ W m}^{-1} = 1600 \text{ W} \quad (3.6)$$

Por lo anterior, mantener la carga térmica constante fue un factor importante que se consideró en el diseño del equipo TRT-IIUNAM. Se realizaron varias investigaciones y se

llevaron a cabo diversas consideraciones técnicas para lograr que la inyección de calor resultara lo más constante posible. El calentador eléctrico que se utilizó es un calentador doméstico de una fase, con una resistencia de cobre intercambiable de 7 kW y una salida de voltaje de 240 Volts. El suministro se conecta directamente a la toma de corriente. El cambio de potencia se realiza mediante una perilla de control de temperatura. Este fue el principal problema en los primeros ensayos del funcionamiento del equipo, ya que la potencia del calentador no se mantenía constante. Por lo que fue necesario colocar un controlador manual del voltaje (dimmer), para controlar el voltaje que se suministra a la resistencia. No obstante, no fue posible mantener una potencia constante, ya que la resistencia funciona a la potencia de fábrica, la cual, tiene un valor muy alto (7 kW) para los requerimientos de este ensayo.

Otra solución que se consideró adecuada para el correcto funcionamiento del calentador incluyó comprar una resistencia de cobre de 2 kW con una salida de voltaje de 120 Volts, menor que la resistencia incluida en el calentador. Para las siguientes pruebas de funcionamiento se intercambió la resistencia, y con el controlador manual se realizaron las mismas pruebas, esta vez el calentador se conectó a una salida de 110 Volts alcanzando una potencia máxima de 1.8 kW, un valor aún por encima de lo que se necesitaba para la prueba.

Como tercera opción y considerando que la potencia máxima de trabajo calculada es de 1.6 kW a 120 Volts, se optó por adquirir una resistencia de cobre con las características necesarias para que la inyección de calor fuera constante, al conectar la resistencia ésta trabajaba solamente a 110 Volts y la resistencia alcanzada era solamente de 1.2 kW, por debajo de la potencia de trabajo requerida.

Por último, se optó por seguir trabajando con la resistencia que venía incluida en el calentador, lo único que se hizo fue reducir el voltaje de salida del calentador, es decir, se conectó a una salida de 110 Volts, obteniendo una potencia de trabajo de aproximadamente 1.660 kW. Para esta solución se desconectó el termostato y el controlador de temperatura del calentador. Con esta última solución, en los ensayos de funcionamiento la potencia suministrada que se registró se mantuvo constante.

El registro de la potencia suministrada por el calentador se hace a través de una placa Arduino mediante una interfaz de salida que cuenta con un código de programación y que registra los datos de los valores medidos cada diez segundos. La placa cuenta con una tarjeta micro SD para guardar la información obtenida a través de la lectura de un medidor de factores eléctricos (potencia, corriente y voltaje) que convierte la información de forma digital y puede visualizarse en tiempo real en una computadora.

3.2.3. Dispositivos de medición

(a) Medición de la temperatura

La medición de la temperatura a la entrada y a la salida del sistema es un factor muy importante para el análisis de los resultados. Comúnmente la diferencia de temperaturas típica para la determinación de la potencia térmica es de 3°C a 5°C. Por lo tanto, se recomiendan sensores de temperatura de resistencia de platino combinados, por ejemplo, Pt 100. Los sensores se seleccionan en pares de modo que las mediciones de diferencia de temperatura pueden tener una precisión de $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ (ECES, 2013).

Los sensores Pt 100 tienen una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0°C, al aumentar la temperatura aumenta su resistencia. El incremento de la resistencia de un sensor Pt 100 no es lineal, pero sí creciente, por lo tanto, mediante tablas es posible determinar la temperatura exacta a la que corresponde la resistencia.

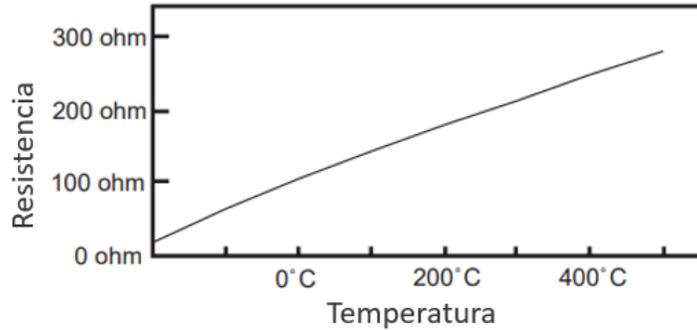


Figura 3.7. Representación gráfica de la temperatura en función de la resistencia (ARIAN Control & Instrumentación, 2011).

Comúnmente el alambre de platino de los sensores Pt 100 está protegido con un vástago de acero inoxidable en un extremo y en el otro está el terminal eléctrico de los cables. Existen tres modos de conexión para los sensores de temperatura Pt 100, con dos, tres y cuatro hilos. Cada uno de ellos requiere de un arreglo diferente en el instrumento lector, además de contar con diferentes características de rango y precisión. La conexión más común de los sensores Pt 100 de tres hilos se representa en la Figura 3.8. La medición de entrada en el equipo lector se basa en el puente de Wheastone.

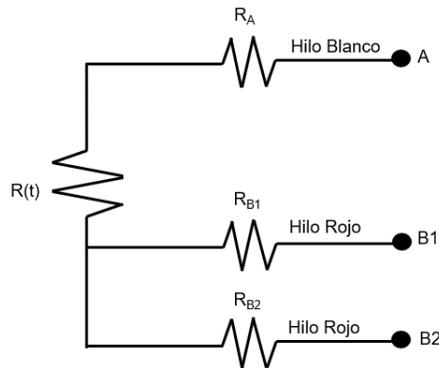


Figura 3.8. Croquis de conexión de un sensor de temperatura Pt 100 de tres hilos.

En el equipo TRT-IIUNAM para el monitoreo de la temperatura a la entrada y a la salida del sistema se colocaron dos sensores de temperatura Pt 100 clase A de tres hilos, con una resistencia de 100Ω a 0°C y un rango de operación de -200°C a 850°C.



Figura 3.9. Sensores de temperatura Pt 100 colocados en el equipo TRT-IIUNAM.

(b) Medidor de flujo

El control del caudal dentro del circuito interno del equipo TRT-IIUNAM es un aspecto muy importante a considerar. La tasa de flujo durante el ensayo debe ser constante y con un flujo turbulento, es decir con un número de Reynolds $R_e > 3000$ (ECES, 2013). Para el control del flujo durante la prueba TRT y por recomendaciones en la literatura (Bandeira Neto, 2015) se utilizó un medidor de flujo tipo turbina que alcanza una precisión de medición de $\pm 2 - \pm 5\%$. El medidor de flujo sirve para evaluar la tasa de flujo suministrada al sistema, garantizando que el caudal sea turbulento y constante. Se ubica aguas arriba de la bomba. La lectura es visual y los datos se recopilan en el sistema de adquisición de datos.

Los medidores de turbina utilizan la energía mecánica del líquido para hacer girar un rotor en el caudal de flujo. La velocidad de rotación del rotor es directamente proporcional a la velocidad del fluido que se desplaza a través del medidor. Se utiliza un sensor de captación magnética que detecta el giro del rotor y genera una salida de frecuencia que puede leerse directamente en la pantalla del medidor. Existen medidores de flujo con salida analógica. Normalmente los medidores de flujo se calibran en la fábrica para garantizar la funcionalidad y precisión de cada equipo.

Para el equipo TRT-IIUNAM se adquirió un medidor de flujo tipo turbina que tiene una capacidad de trabajo de 2 a 20 GPM en un rango de -18°C a $+60^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.10). El medidor de flujo está diseñado para un sistema de flujo unidireccional, tiene una flecha que indica la dirección del fluido. Para su colocación requiere de al menos 10 diámetros de tubería de distancia aguas arriba y 5 diámetros de tubería aguas abajo, para crear un flujo uniforme.



Figura 3.10. Medidor de flujo tipo turbina instalado en el equipo TRT-IIUNAM.

El medidor de flujo tipo turbina, se envió con un certificado de calibración que verifica la precisión del medidor de flujo, garantizando su trabajabilidad bajo los estándares nacionales e internacionales (Anexo A). La calibración se realizó con agua, asegurando la simulación óptima de operación en cuanto a viscosidad y cambio de temperatura. Por lo general, se registran 10 puntos de datos a lo largo del rango de flujo del medidor, entre más puntos se registren mejor definida queda la curva de calibración.

El medidor de flujo está conectado al monitor PLC que registra pulsos, es decir, la frecuencia del giro de la turbina al paso del agua. Para conocer el caudal hidráulico que ha registrado el monitor se debe ocupar un factor de K de calibración del medidor de flujo, que varía muy ligeramente a diferentes caudales de volumen. El factor de calibración K es un promedio de los puntos de medición individuales. Por lo tanto, el cálculo del caudal volumétrico dentro del sistema se calcula de la siguiente manera:

$$Q = \frac{f \times 60}{K} \quad (3.7)$$

donde f es la frecuencia de medición, K es el factor de calibración, Q es el caudal volumétrico expresado en litros por minuto.

(c) Medición de la presión

El monitoreo de la presión durante el ensayo TRT ayuda a monitorear las caídas de presión y así evitar que la tubería se llene de burbujas de aire y dañe la bomba por el fenómeno de cavitación. Los transductores de presión digitales son dispositivos de medición que transforman la presión de la tubería en un valor eléctrico; este valor suele ser de 4 a 20 mA, dicho valor puede visualizarse en la pantalla de monitoreo.

El circuito interno consta de dos transductores de presión a la entrada y a la salida del sistema (Figura 3.11). Los parámetros se configuran en el dispositivo o a través de una aplicación para teléfono inteligente con NFC (Near Field Communication). Para su funcionamiento fue necesario inicialmente alimentarlos con una fuente eléctrica externa de 5 volts.



Figura 3.11. Transductores de presión colocados en el equipo TRT-IIUNAM.

3.3. Sistema de adquisición de datos

(a) Datalogger

El ensayo de respuesta térmica tiene una duración de varios días y el registro de los datos que arroja cada uno de los dispositivos del circuito interno se debe realizar como mínimo cada 10 segundos. El error instrumental debe ser lo más pequeño posible como para permitir un error de medición de temperatura, una señal analógica típica, de $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ECES, 2013).

Para el equipo TRT-IIUNAM primero se adquirió un sistema de adquisición de datos (datalogger) con 16 entradas analógicas diferenciales o 32 asimétricas para mediciones de tensión (Figura 3.12). Las entradas analógicas utilizadas son sensores de temperatura Pt 100 de tres hilos. Los transductores de presión se conectan a los canales con salida de señal de 4 a 20 mA. Cada uno de los dispositivos que puede leer el datalogger cuenta con un diagrama de conexión en el software del equipo.



Figura 3.12. Equipo de adquisición de datos utilizado durante el primer ensayo TRT.

(b) Monitor PLC

Un monitor PLC (*Programmable Logic Controller*) es un dispositivo de automatización industrial; que trabaja para múltiples señales de entrada y de salida, amplios rangos de temperatura, es inmune al ruido eléctrico y resistente a la vibración y al impacto (Perez-Molina *et al.*, 2013).

El monitor PLC debe contar con un suministro de potencia para garantizar los voltajes de funcionamiento internos de los dispositivos se conectan. Los valores frecuentes más utilizados son $\pm 5V$, $\pm 12V$ y $\pm 24V$. También cuentan con un CPU interno, que es la parte donde se llevan a cabo los procesos de control y transferencia de datos. El módulo de salida es el que genera las señales digitales y analógicas para la visualización de los datos en tiempo real.



Figura 3.13. Monitor PLC convencional.

3.4. Fuente de alimentación eléctrica

Para la prueba experimental y puesta en marcha del equipo TRT-IIUNAM se instaló dentro del remolque un generador eléctrico de 5000 Watts. Se trata de un generador de corriente alterna (CA), accionado por motor, de campo giratorio equipado con un regulador de voltaje. Este generador está diseñado para suministrar energía eléctrica para iluminación, aparatos, herramientas y motores compatibles. El regulador de voltaje dentro del generador está diseñado para mantener el nivel de voltaje de salida automáticamente. El generador eléctrico cuenta con tres tomas dobles de 120 Volts de CA, 20 A y una toma de 120/240 Volts de CA, 30 A. El generador eléctrico tiene una capacidad de 30 litros de gasolina y puede trabajar por su cuenta 12 horas continuas, se puede utilizar para pruebas de corta duración.



Figura 3.14. Generador eléctrico S500.

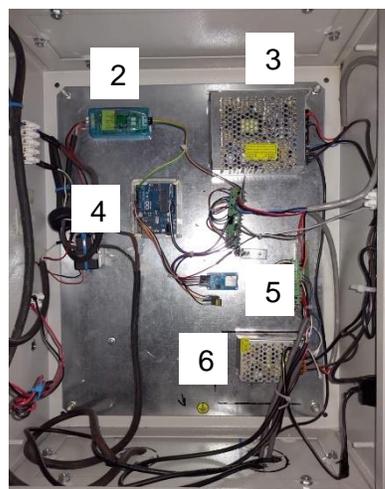
3.5. Control eléctrico

(a) Caja eléctrica

El primer diseño del equipo TRT-IIUNAM contaba con una caja de control eléctrico donde se conectaron la bomba, el calentador eléctrico, los dispositivos de monitoreo y adquisición de datos. Los transductores de presión se conectaron a una fuente de poder externa de 5 Volts. El medidor de flujo se conectó para su alimentación eléctrica a una fuente de poder externa de 12 Volts. El suministro eléctrico de los transductores de presión y el encendido del calentador eléctrico se realizó desde un único enchufe que va conectado al generador eléctrico con una corriente de 120 V AC. La caja eléctrica donde están integrados estos dispositivos cuenta con un interruptor general entre el suministro eléctrico y los dispositivos, con la finalidad de manipularlos antes de encender el equipo. En la Figura 3.15 se describen los componentes principales de la caja eléctrica para el control de los elementos del circuito interno del equipo TRT-IIUNAM.



(a) Vista exterior



(b) Vista interior

- | | |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1) Medidor de consumo eléctrico externo | 4) Placa Arduino uno |
| 2) Medidor de consumo eléctrico interno | 5) Módulo lector de tarjeta Micro SD para Arduino |
| 3) Fuente de poder de 12 Volts y 5 Amperes Dc. | 6) Fuente de poder de 5 Volts y 5 Amperes Dc. |

Figura 3.15. Componentes que integran la caja eléctrica: a) vista exterior y b) vista interior.

(b) Cuadro eléctrico

El cuadro de distribución protege cada uno los circuitos que componen la instalación eléctrica. Éstos se encargan de distribuir la potencia adecuada a cada uno de los aparatos que están conectados. Lo conforman el interruptor automático de corte onnipolar, el interruptor diferencial y cada uno de los circuitos independientes protegidos por interruptores automáticos. El equipo TRT-IIUNAM cuenta con un tablero que alberga los interruptores, los dispositivos de medición que son los sensores de temperatura, el medidor de flujo, los transductores de presión y el calentador eléctrico. Con lo anterior se evita tener más de una extensión eléctrica para conectar todos los dispositivos.

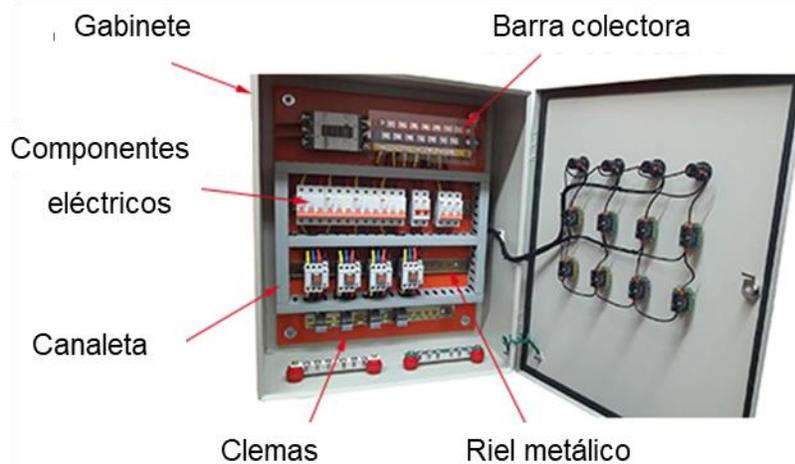


Figura 3.16. Cuadro eléctrico convencional.

Para concluir la descripción del diseño del equipo TRT-IIUNAM, la Figura 3.17 presenta una fotografía detallada del primer diseño del equipo TRT-IIUNAM (2020). Adicionalmente, la Figura 3.18 muestra las modificaciones realizadas, así como, una vista detallada del nuevo equipo TRT-IIUNAM (2021).

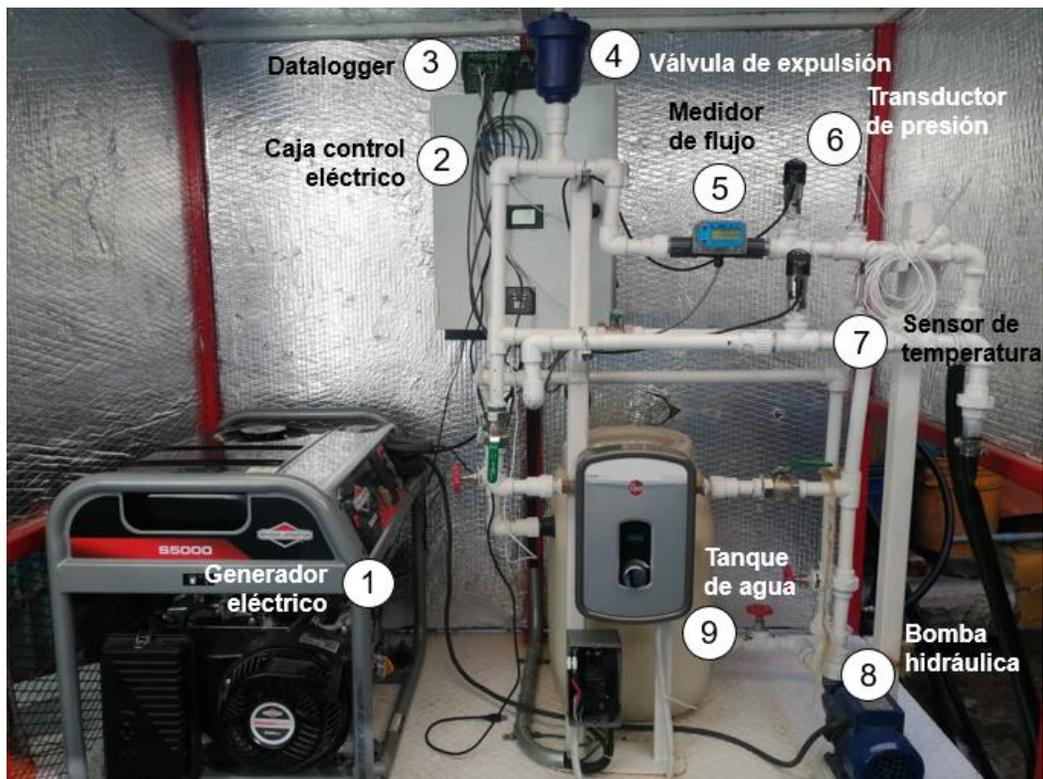


Figura 3.17. Primer diseño del equipo TRT-IIUNAM (2020).

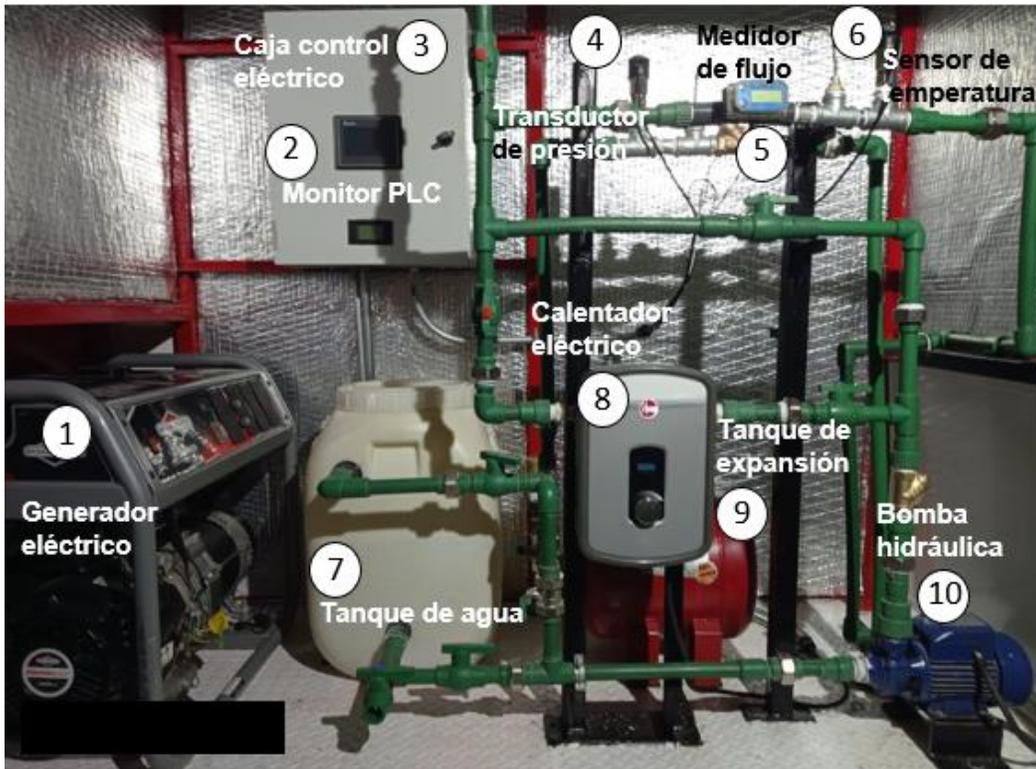


Figura 3.18. Mejorías realizadas al equipo TRT-IIUNAM (2021).

4. EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE RESPUESTA TÉRMICA EN MÉXICO CON EL EQUIPO TRT-IIUNAM

4.1. Consideraciones generales

En este capítulo se presentan dos casos prácticos del ensayo TRT *in situ* para determinar las propiedades térmicas del suelo. El primer ensayo se realizó en diciembre de 2020 en una de las seis primeras pilas de energía construidas en el país, en un predio ubicado al poniente de la Ciudad de México. El segundo ensayo se efectuó en el mes de abril de 2021 en un pozo de prueba en el subsuelo del municipio de Naucalpan de Juárez en el Estado de México. El ensayo TRT permite determinar las propiedades térmicas *in situ* de los suelos (conductividad térmica λ del suelo y resistencia térmica del pozo R_b), requeridas para el diseño e implementación de pozos intercambiadores de calor (BHE), pilas de energía y otras estructuras termoactivas. Adicionalmente, en este capítulo también se incluyen los resultados de ensayos realizados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM para determinar las propiedades térmicas del suelo con ayuda del equipo *KD2 Pro* en seis muestras inalteradas de suelo extraídas con tubo dentado en la exploración geotécnica realizada en el sitio del municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México.

4.2. Ensayo TRT en una de las primeras seis pilas de energía mexicanas

4.2.1. Localización

La pila de energía ensayada forma parte del sistema de cimentación del Proyecto “Residencia privada C73” que consta de ocho pilas, de las que seis de ellas, son pilas de energía. Los parámetros térmicos del suelo se obtuvieron realizando el ensayo TRT en una pila de energía de 15.5 m de profundidad y 0.80 m de diámetro. El proyecto se ubica, al poniente de la Ciudad de México. Desde el punto de vista geotécnico y de acuerdo con la zonificación geotécnica definida en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones vigentes (NTCDCC-2017), el sitio de prueba se encuentra ubicado en la denominada Zona I (Lomas).

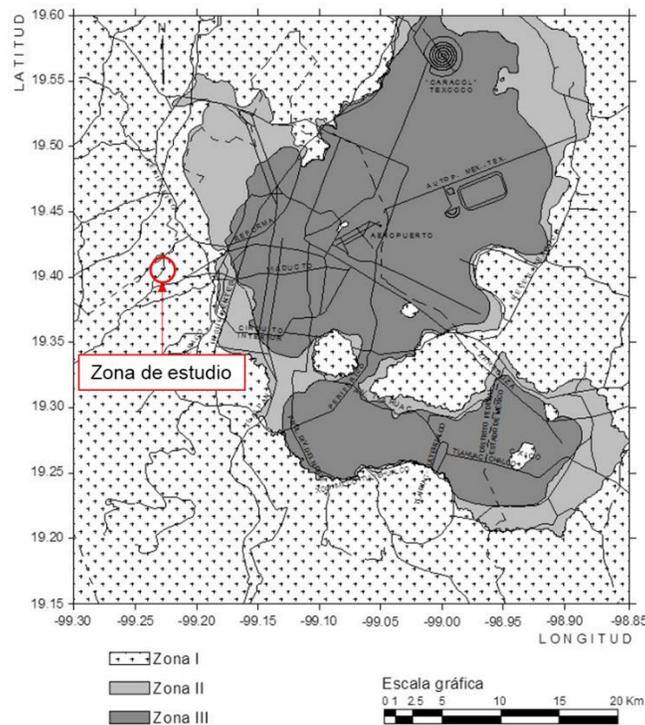


Figura 4.1. Localización del sitio de estudio (NTCDCC-2017).

4.2.2. Estratigrafía

La estratigrafía del sitio de interés se obtuvo a partir de investigaciones geotécnicas basadas en pruebas de penetración estándar (SPT). La zona de estudio se compone de seis unidades geotécnicas:

U1: El estrato superior está formado por material de relleno que se extiende hasta los 0.6 m de profundidad.

U2: Debajo del relleno, existe una formación de arena limosa andesítica que va hasta los 6.5 m de profundidad;

U3: Bajo este estrato se extiende hasta los 8.5 m de profundidad una capa de grava mal graduada.

U4: Enseguida se superpone una capa de grava limosa con arena hasta los 11.5 m de profundidad.

U5: La penúltima capa que llega a 16.0 m de profundidad está constituida por una arena mal graduada de color marrón grisáceo.

U6: El último estrato está formado por fragmentos de roca andesítica con una Designación de Calidad de Roca RQD-6%.

No se detectó nivel de aguas freáticas hasta la profundidad del sondeo.

4.2.3. Etapas del ensayo TRT en una pila de energía

(a) Construcción de la pila de energía

Inicialmente se realizó la perforación de las pilas como se ilustra en la Figura 4.2. Se utilizaron tuberías de revestimiento para asegurar la estabilidad del pozo perforado.



(a) Perforación



(b) Colación de la tubería de revestimiento

Figura 4.2. Construcción de la pila de energía.

Las tuberías tipo PEAD de la pila de energía se colocaron en un armado rígido de un sólo estribo en hélice, y se sujetaron en forma transversal respetando los espaciamientos máximos recomendados de 1 m para amarres metálicos. La separación mínima entre la base e inicio del refuerzo y la parte inferior del bucle se muestran en la Figura 4.3. Además, las tuberías se unieron mediante un proceso de termofusión. Además, se colocó un codo termo-soldable en forma de U al final del arreglo para garantizar el radio de curvatura. En la Figura 4.4 se ilustran detalles de la colocación y armado de las pilas de energía. Se realizaron pruebas de presión en el arreglo de las tuberías con duración de una hora a una presión de 100 psi. Con lo anterior se corrobora que no existen daños y fugas en la tubería. Después de la instalación, la perforación para la pila se rellena con una mezcla de concreto.

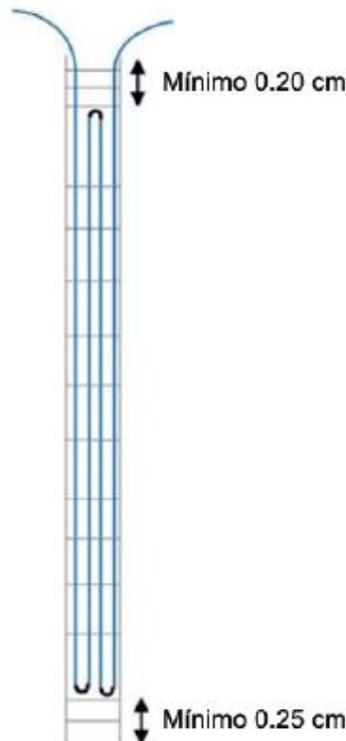


Figura 4.3. Separación mínima de inicio y final del bucle de las tuberías de la pila de energía (López-Acosta, Barba- Galdámez, 2020).

4. Ejecución de ensayos de respuesta térmica en México con el equipo TRT-IIUNAM



(a) Armado rígido de la pila de energía



(b) Colocación de los codos en forma de U



(c) Prueba de presión



(d) Izaje del armado rígido y las tuberías PEAD



(e) Colocación del material de relleno en la perforación



(f) Pila de energía con tuberías sobresalientes para conexión

Figura 4.4. Instalación y montaje de la tubería durante la construcción de la pila de energía.

(b) Montaje y puesta en marcha del equipo TRT-IIUNAM

El protocolo de ensayo consistió en trasladar el equipo TRT-IIUNAM al sitio de estudio, con ayuda de un transporte especial. En el sitio de prueba se revisó que los componentes del circuito interno no estuvieran dañados. La pila de energía construida, donde se realizaría el ensayo TRT, no se encontraba a nivel del terreno natural. Por lo que, fue necesario realizar una excavación y preparar el equipo para descender a la profundidad prevista para el ensayo. En seguida, se revisaron los componentes del circuito interno y se conectaron todos los dispositivos. Posteriormente, se cortaron las tuberías de 1" de diámetro de la pila de energía y se les colocó un aislante térmico de polietileno expandido. Antes de iniciar el ensayo TRT se midió la temperatura media del suelo del sitio con ayuda de un sensor de temperatura Pt 100 a lo largo de la tubería de la pila de energía llena de agua. Después de medir la temperatura media del suelo se dio inicio a la prueba.

El ensayo tuvo una duración de 60 horas. La potencia de calentamiento nominal se estimó en 1 700 Watts y un flujo de agua en la tubería de 0.557 m³/h. La pila tiene un arreglo de tuberías de 4 bucles en forma de U conectados en serie. Durante el tiempo del ensayo se registraron los valores de temperatura a la entrada y a la salida del sistema de tuberías, así como, la presión de trabajo y el flujo a lo largo de la tubería. La frecuencia de obtención de los datos consistió en una lectura cada 10 segundos simultáneamente (para todos los parámetros en observación). Después de 60 horas de calentamiento, se apagó todo el equipo y se descargaron todos los datos registrados. Los pasos del montaje y la puesta en marcha del equipo TRT-IIUNAM se resume con fotografías en la Figura 4.5.



(a) Llegada del equipo a la obra



(b) Ubicación del equipo en el sitio de prueba

Figura 4.5. Etapas del montaje y la puesta en marcha del equipo TRT-IIUNAM para la prueba en la primera pila de energía construida en México.



(c) Colocación del aislante térmico



(d) Medición de la temperatura media del suelo



(e) Monitoreo del ensayo durante la noche



(f) Monitoreo del ensayo durante el día

Figura 4.5. (continuación) Etapas del montaje y la puesta en marcha del equipo TRT-IIUNAM para la prueba en la primera pila de energía construida en México.

4.2.4. Determinación de las propiedades térmicas del suelo del sitio

Se midió la temperatura media del suelo con ayuda de un sensor de temperatura Pt 100 a lo largo de la tubería llena de agua. La pila de energía se encontraba en equilibrio térmico con el medio cuando se realizaron estas mediciones. La temperatura del suelo se midió a cada metro de los 15.5 m de longitud total de la pila de energía. El perfil de temperatura resultante a lo largo de la pila de energía se muestra en la Figura 4.6. Con base en las mediciones, se estimó una temperatura media (promedio aritmético) del suelo del sitio $T_m = 18.8^\circ\text{C}$. La parte superior de la pila de energía no refleja la temperatura del suelo, pues resulta alterada por las condiciones ambientales (Gehlin y Nordell, 2003).

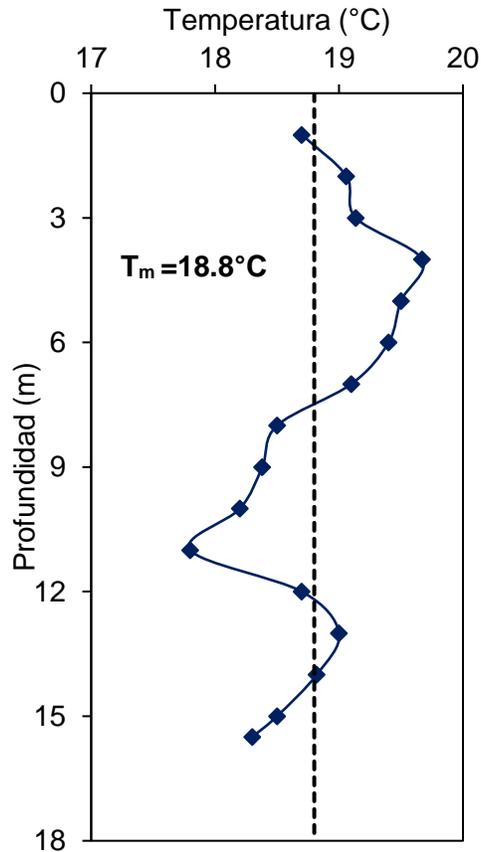


Figura 4.6. Perfil de temperatura del suelo del sitio, medido a lo largo de la pila de energía.

Después de determinar la temperatura media del suelo, se dio inicio al ensayo TRT. Todos los dispositivos se conectaron al sistema de adquisición de datos. Durante el tiempo del ensayo se registraron los valores de temperatura a la entrada y a la salida del sistema, así como la presión de trabajo y el flujo a lo largo de la tubería. La frecuencia de obtención de los datos fue de una lectura cada 10 segundos simultáneamente (para todos los parámetros en observación). La potencia por unidad de longitud suministrada a la pila de energía fue de aproximadamente 110 W/m. El ensayo TRT tuvo una duración de 60 horas y sólo se realizó la etapa de calentamiento. La potencia de calentamiento nominal se estimó en 1700 W.

Las temperaturas a la entrada y salida del sistema registradas del fluido circulante, así como, la temperatura media calculada se presenta en la Figura 4.7. Como se observa en dicha figura, la temperatura media del fluido aumentó continuamente con el tiempo hasta que se comenzó a alcanzar un estado estable. Se requiere de mayor tiempo para lograr el estado estable en pilas de energía con diámetros mayores que 0.152 m (152 mm) (Loveridge *et al.*, 2014). Durante la prueba, el caudal de la bomba se mantuvo casi constante en aproximadamente 0.557 m³/h y la entrada de energía del calentador es de aproximadamente 1.704 kW como se muestra en la Figura 4.8.

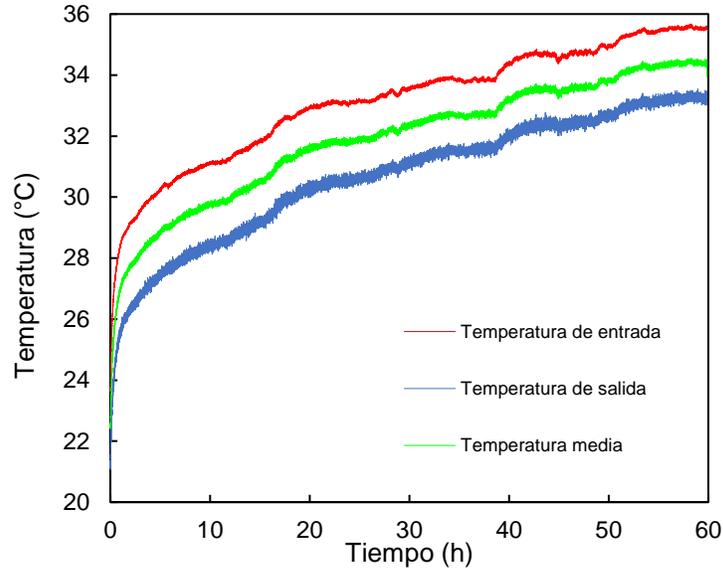


Figura 4.7. Temperaturas de entrada, de salida y media del fluido durante el ensayo TRT.

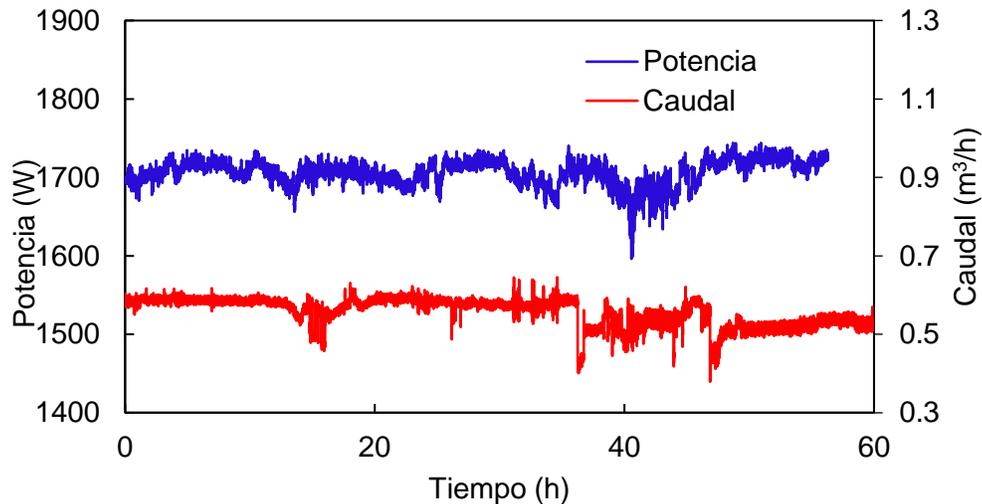


Figura 4.8. Potencia del calentador y caudal del fluido durante el ensayo TRT.

Los datos obtenidos de la prueba TRT se interpretaron con el método transitorio propuesto por Loveridge *et al.* (2013). Se trata de un método empírico denominado *función G* descrito en el inciso 1.5.1., que simula el comportamiento térmico transitorio de ensayos de respuesta térmica en pilas de mayor diámetro y tiempos de ensayo cortos. El cambio de temperatura del fluido transmisor de calor durante la etapa de calentamiento se calcula como la suma del cambio de temperatura en las tuberías y las funciones G siguientes:

$$\Delta T_f(t) = qR_p + qR_c G_c + \frac{q}{2\pi\lambda_g} G_g \quad (4.1)$$

donde $\Delta T_f(t)$ es el cambio de temperatura del fluido en circulación durante la etapa de calentamiento, q es la tasa de transferencia de calor por metro de longitud de la pila de energía, R_p es la resistencia de las tuberías (incluido el fluido) y R_c es la resistencia de la parte del concreto de la pila, λ_g es la conductividad térmica del suelo.

Utilizando la técnica de mínimos cuadrados no lineal es posible determinar λ_g y R_c de la Ecuación (4.1) anterior. Los valores de las propiedades térmicas obtenidos de esta manera, se proporcionan en la Tabla 4.1. Con base en estos resultados, la conductividad térmica del sitio es $\lambda = 1.63 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$, y la resistencia térmica de la pila es $0.078 \text{ m}^{\circ}\text{C W}^{-1}$.

Tabla 4.1. Propiedades térmicas del sitio al poniente de la CDMX, obtenidas del ensayo TRT en una pila de energía.

Difusividad térmica, D (m ² /s)	F ₀	t (s)		Conductividad térmica, λ (W m ⁻¹ C ⁻¹)	Resistencia térmica, R _b (m °C W ⁻¹)	RMSE
		F ₀ =0.01	F ₀ =0.25			
2.00E-07	1.25E-06	8000	200000	0.5308	0.1318	0.8662
3.00E-07	1.88E-06	5333	133333	0.87	0.1179	0.6325
4.00E-07	2.50E-06	4000	100000	1.11	0.1095	0.5109
5.00E-07	3.13E-06	3200	80000	1.258	0.1033	0.4328
8.00E-07	5.00E-06	2000	50000	1.46	0.091	0.2895
9.00E-07	5.63E-06	1778	44444	1.504	0.0882	0.2665
1.00E-06	6.25E-06	1600	40000	1.539	0.08572	0.2513
1.40E-06	8.75E-06	1143	28571	1.633	0.078	0.2254
2.00E-06	1.25E-05	800	20000	1.703	0.0702	0.229
3.00E-06	1.88E-05	533	13333	1.757	0.0617	0.257
4.00E-06	2.50E-05	400	10000	1.783	0.0559	0.2824

Nota: F₀ = número de Fourier, RMSE = error cuadrático medio

El análisis con el modelo transitorio empleado (Loveridge *et al.*, 2013) muestra un buen ajuste con los datos medidos *in situ* obtenidos con la prueba TRT realizada. La bondad del ajuste (RMSE) entre los valores obtenidos del modelo y la prueba en campo es mínimo, lo indica que el modelo representa de manera correcta el comportamiento de la prueba TRT en campo, como se puede apreciar en la Figura 4.9.

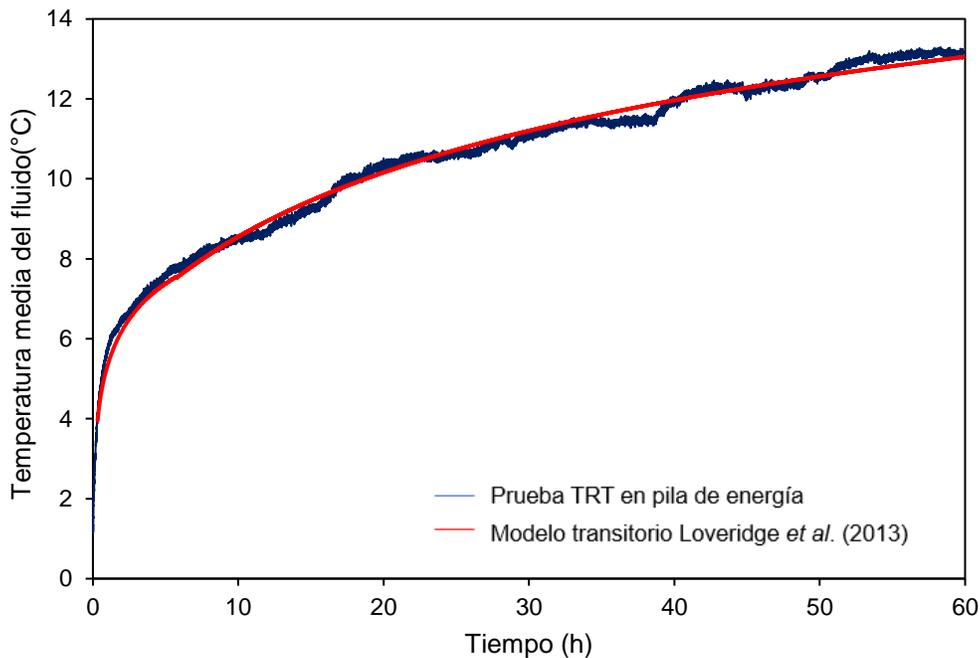


Figura 4.9. Ajuste del modelo transitorio a los datos medidos *in situ* obtenidos con la prueba TRT.

4.3. Ensayo TRT en un pozo de prueba en el subsuelo

4.3.1. Localización

La prueba TRT se realizó en un pozo de prueba perforado en el subsuelo del sitio de 20 metros de profundidad y 0.15 m de diámetro. El sitio de prueba se localiza en el municipio de Naucalpan de Juárez (en la zona noreste del Estado de México), en un terreno de topografía irregular, siendo la porción del área de pruebas la de mayor elevación con respecto al resto del terreno y al nivel de vía pública principal. El municipio de Naucalpan de Juárez limita al Norte con los estados de Querétaro e Hidalgo, al Sur con Guerrero, Morelos y la Ciudad de México; al Oriente, con los estados de Puebla y Tlaxcala, y al Poniente con Michoacán y Guerrero. Tiene una superficie de 22,185.45 km², que representa el 1.1% de la superficie nacional (Atlas de Riesgos del Estado de México, 2014).

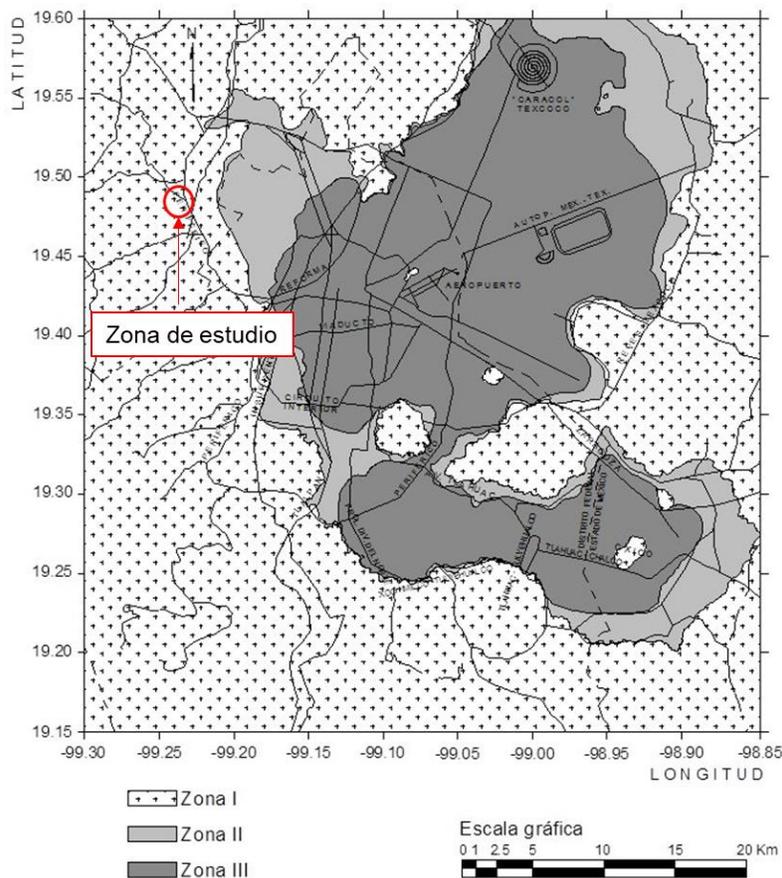


Figura 4.10. Localización del sitio de estudio (NTCDCC-2017).

4.3.2. Geología

El municipio, está ubicado en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico que abarca la mayor parte de la superficie estatal y la Sierra Madre del Sur. La litología está compuesta en gran parte de rocas ígneas volcánicas y sedimentarias, provenientes del periodo Terciario de la era Cenozoica y en menor medida del período Cuaternario (Martínez, 2012). Naucalpan está al pie de la Sierra de las Cruces, la cual, está conformada por tobos, brecha andesítica, pómez, arena y limo (Santana, 2011).

Los suelos de origen aluvial y volcánico pertenecen a las partes más bajas del municipio, los suelos superficiales son estratos de material vegetal con espesores de aproximadamente de 1 a 2 m, después se distinguen los suelos pertenecientes a las series Clástica Fluvial y Aluvial (materiales granulares aluviales y depósitos superficiales de color negro y vidrio volcánico) de las formaciones de la Sierra de Las Cruces, la Sierra Tepetzotlán y la Sierra de Guadalupe (Martínez, 2012).

En las partes altas de Naucalpan las formaciones geológicas son principalmente La Tarango y La Becerra, compuestas por brecha andesítica con intercalaciones de pómez, arena y limo. Las formaciones de las Sierras Menores contienen numerosos horizontes de toba, ceniza y capas de pómez, provenientes de las erupciones de la Sierra de Las Cruces y están constituidas por lava, toba y aglomerados basálticos, andesíticos y dacíticos (Santana, 2011).

El predio de estudio se ubica al noreste de la Ciudad de México donde se localizan depósitos aluviales (Qal) que se originaron en el período Cuaternario Superior, integrados por grava, arena y limos con estratificación de ceniza volcánica en los valles de México y Toluca. Desde el punto de vista geotécnico se localiza sobre una unidad de tobas redepositadas.

4.3.3. Temperatura ambiente media anual

De acuerdo con lo descrito en el inciso 2.4.6, se obtuvo el perfil de la temperatura ambiente del sitio, ajustando una función sinusoidal con los datos obtenidos de la estación meteorológica Totolica San Bartolo (clave 15127), por ser la más cercana al sitio de prueba. Se consideraron las temperaturas medidas entre los años 2013 y 2014. En la Figura 4.11 se muestra la temperatura ambiente media anual, $T_m = 17.97\text{ }^\circ\text{C}$, y la amplitud máxima anual en el sitio de estudio $A_0 = 3.75\text{ }^\circ\text{C}$.

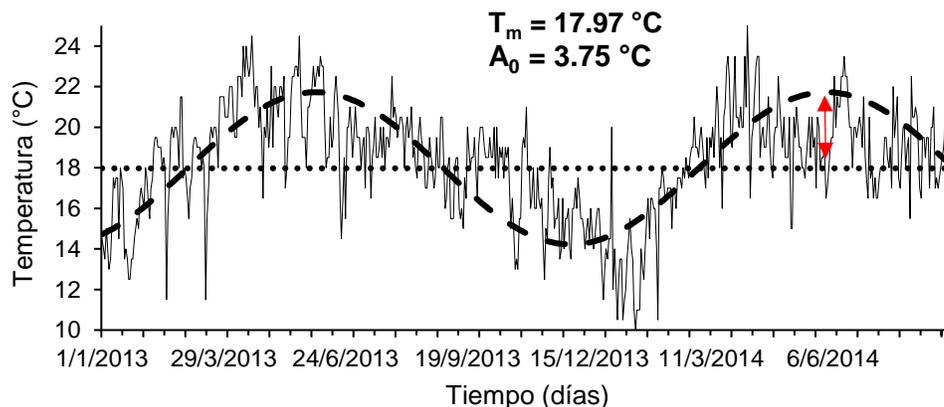


Figura 4.11. Temperatura ambiente media en el Municipio de Naucalpan de Juárez (Edo. De México) entre los años 2013 y 2014 y curva sinusoidal idealizada.

A partir de la temperatura ambiente media anual, es posible estimar la variación de la temperatura del suelo a distintas profundidades durante un año. En la Figura 4.12 se muestra la variación de temperatura con la profundidad para los distintos meses del año. Se observa que la temperatura disminuye con la profundidad, y a partir de 12 m se vuelve aproximadamente constante e igual a la temperatura ambiente media anual $T_m = 17.97\text{ }^\circ\text{C}$.

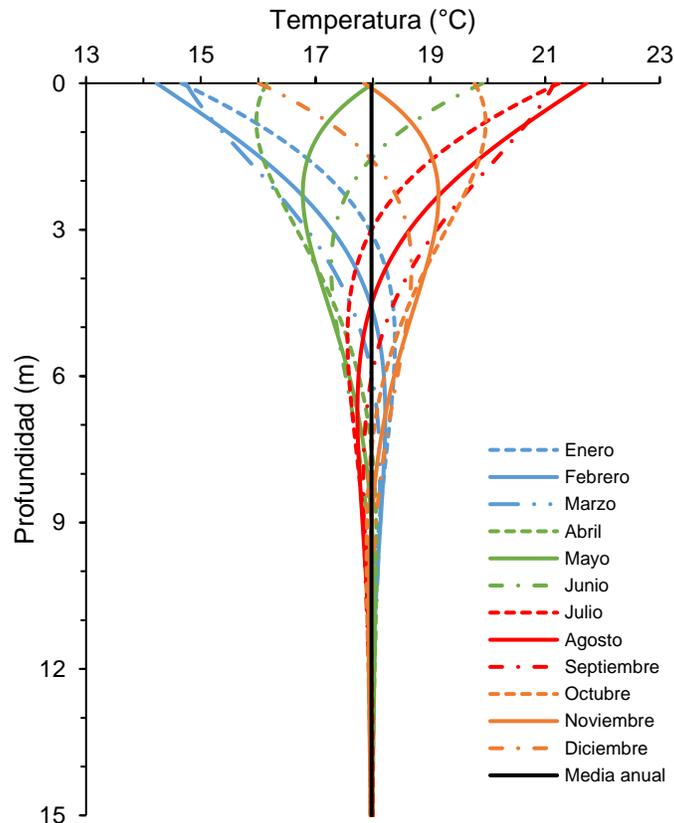
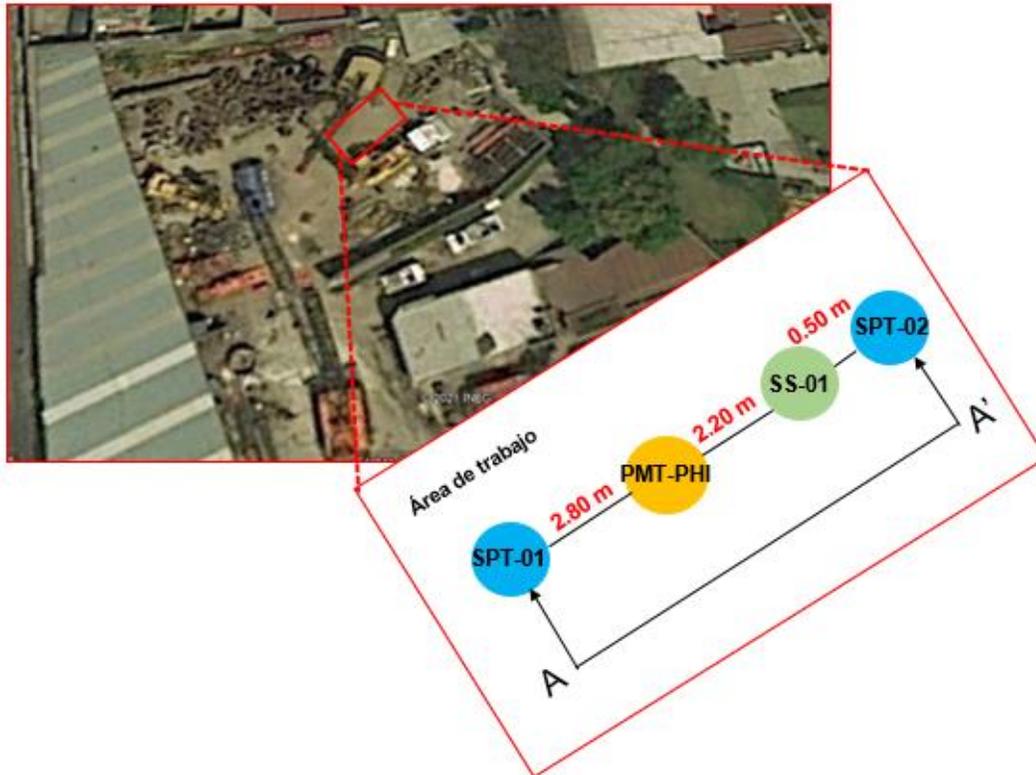


Figura 4.12. Variación con la profundidad de la temperatura en el suelo medida durante un año en la estación meteorológica Totolica San Bartolo, cercana al sitio de estudio en el Municipio de Naucalpan de Juárez, Edo. de México.

4.3.4. Exploración geotécnica

Como parte de la campaña de exploración se realizó la ejecución de dos sondeos de penetración estándar a 25 m de profundidad (SPT-01 y SPT-02), El sondeo SPT-02 se combinó con la extracción de diez muestras inalteradas a diferentes profundidades. Asimismo, se realizó un sondeo selectivo adicional (SS-01), para la recuperación de muestras inalteradas con tubo dentado en los suelos firmes de interés. Adicionalmente se ejecutaron pruebas con Ficómetro (Fi) y Presiómetro de Menard (PTM) a diferentes profundidades de interés.

En la Figura 4.13, se muestra la ubicación esquemática en planta de los sondeos realizados, y en la Tabla 4.2 se proporcionan las profundidades y las coordenadas de ubicación de los mismos.



Nota: Croquis fuera de escala

Figura 4.13. Localización esquemática de los sondeos geotécnicos de la exploración y muestreo.

Tabla 4.2. Profundidades y coordenadas de localización de los sondeos.

Sondeo	Profundidad (m)	Coordenadas UTM	
		X	Y
SPT-01	25.23	473724	2152588
SPT-02	25.22	473700	2152591
SS-01	14.00	473729	2152591
PMT-PHI	23.90	473727	2152589

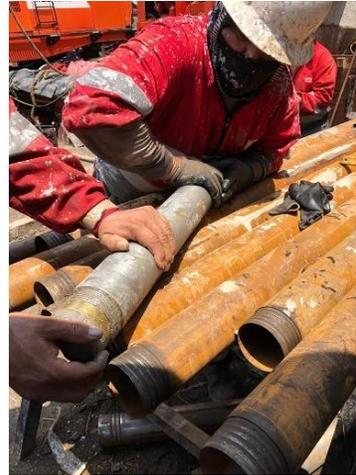
Para la ejecución de la perforación se utilizó una máquina perforadora Mobile Drill B61 montada sobre camión International modelo 85. Se realizaron cinco pruebas de Ficómetro (PHI) a diferentes profundidades (3.0 m, 9.0 m, 13.5, 18 m y 23.0 m) con el fin de determinar los parámetros de resistencia de Mohr- Coulomb (c y ϕ), también se realizaron cinco pruebas de Presiómetro de Menard (PMT) a diferentes profundidades (1.8 m, 7.8 m, 12.3 m, 16.8 m y 21.8 m), cuyos resultados son útiles para determinar el módulo de elasticidad en estratos de difícil muestreo inalterado.

En la Figura 4.14 se presentan detalles de la campaña de exploración geotécnica, así como la ejecución de las pruebas de Ficómetro y Presiómetro. En las Tablas 4.3 y 4.4 se resumen los resultados de dichas pruebas.

4. Ejecución de ensayos de respuesta térmica en México con el equipo TRT-IIUNAM



(a) Máquina perforadora
Mobile Drill B621



(b) Extracción de muestras



(c) Sonda de Ficómetro



(d) Inmersión de la sonda de
Ficómetro en el barreno



(e) Membrana para pruebas
con Presiómetro Menard



(f) Ejecución de la prueba con
Presiómetro Menard

Figura 4.14. Detalles de la exploración geotécnica.

Tabla 4.3. Resultados de las pruebas de Ficómetro.

Sondeo	No. Prueba	Profundidad (m)	c (kg/cm ²)	φ°
Ficómetro	1	3.0	1.36	26.7
	2	9.0	0.46	40.9
	3	13.5	2.20	37.1
	4	18.0	0.92	36.4
	5	23.0	0.77	37

Nota: c= cohesión del material, φ°= ángulo de fricción

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de Ficómetro y como se observa en la correlación de la Tabla 4.4, el material ensayado tiene un comportamiento friccionante y es una mezcla de arenas limosas con presencia de gravas.

Tabla 4.4. Correlación aproximada entre el esfuerzo cortante in situ del ficómetro y esfuerzo cortante en el laboratorio ((González *et al.*, 2012).

Ficómetro		Tipo de suelo	Estimación	
Ángulo de fricción	Cohesión		Ángulo de fricción	Cohesión
φ _i (°)	c _i (kN/m ²)		φ' (°)	c' (kN/m ²)
≤ 15	-	Arcilla suave	17	0
	≥ 20	Arcilla rígida	17	c _i /4
15 < φ _i ≤ 25	< 20	Suelos no cohesivos	25	0
	≥ 20	Limos, mezclas de arenas, limos y arcillas	25	c _i /3
25 < φ _i ≤ 30	< 20	Suelos no cohesivos	φ _i	0
	≥ 20	Limos, mezclas de arenas, limos y arcillas	φ _i	c _i /3
> 30	< 10	Suelo con gravas y pocos finos	φ _i	0
	≥ 10		φ _i	c _i /2
> 25	-	Rocas alteradas	φ _i	> c _i

Tabla 4.5. Resultados de las pruebas de Presiómetro de Menard.

Sondeo	No. Prueba	Profundidad (m)	Ciclo de carga		Ciclo de recarga		G _{recarga} /G _{carga}
			E _m (MPa)	G (MPa)	E _m (MPa)	G (MPa)	
Presiómetro de Menard	1	1.8	108.7	40.0	485.4	181.7	4.5
	2	7.8	389.6	145.2	813.5	304.7	2.1
	3	12.3	699.7	261.1	2,329.9	873.8	3.3
	4	16.8	1,532.2	573.7	-	-	-
	5	21.8	1,541.2	577.5	2,005.5	751.9	1.3

Nota: E_m=módulo de Menard, G=módulo de corte

De los resultados obtenidos, se observa que para la prueba número 4 no fue posible determinar la presión límite debido a la consistencia dura del material ensayado, se sugiere que la presión límite está por encima del valor máximo de inyección que se reportó 5.3 MP.

4.3.5. Estratigrafía

A partir de los sondeos SPT realizados, se obtuvo el corte estratigráfico preliminar que se ilustra en la Figura 4.15. Asimismo, a partir del sondeo selectivo con recuperación de muestras con tubo dentado se obtuvieron 6 muestras inalteradas de suelo que se utilizaron

4. Ejecución de ensayos de respuesta térmica en México con el equipo TRT-IIUNAM

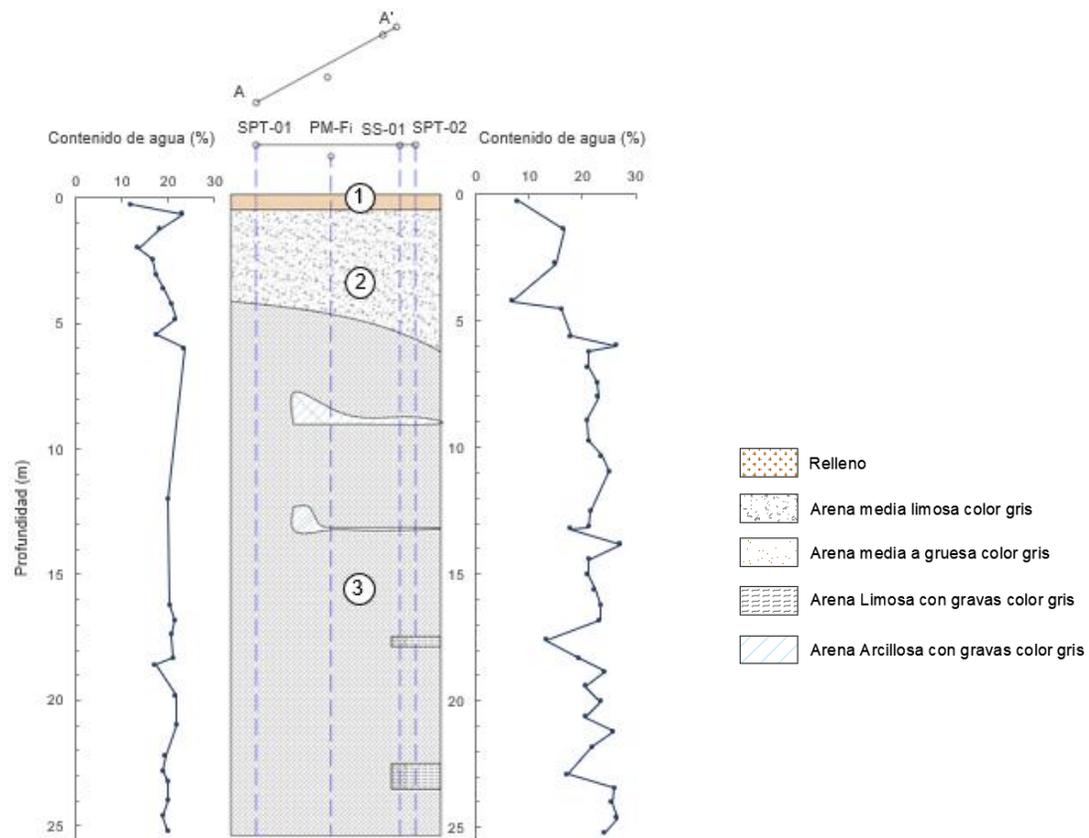
para el estudio de las propiedades térmicas en el laboratorio. Las muestras inalteradas fueron caracterizadas en el laboratorio con distintas pruebas índice. Tomando en cuenta la exploración geotécnica en campo y la caracterización complementaria hecha en el laboratorio, se definió el perfil estratigráfico simplificado de la Figura 4.16. Con base en lo anterior, la estratigrafía de la zona de estudio se compone de las siguientes unidades geotécnicas:

1) Relleno (RE). Se trata de un estrato constituido por un relleno de aproximadamente 60 cm de espesor conformado por material de construcción y gravas empacadas en arena color café compacta.

2) UG-A. Se encuentra conformado por arena color café gris, muy compacta con arcilla y muy poca grava.

3) UG-B. Está formado por arena color café gris, muy compacta con limo y grava.

4) UG-C. Se trata de un estrato conformado por arena color gris, muy compacta con limo y poca grava.



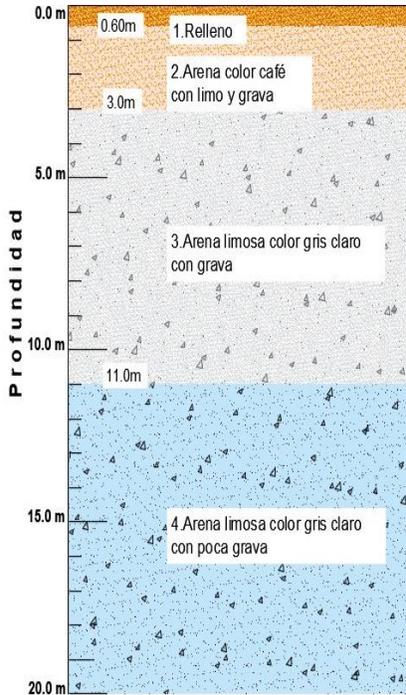


Figura 4.16. Perfil estratigráfico simplificado de la zona de estudio, con base en la exploración geotécnica *in situ* y la caracterización complementaria hecha en el laboratorio.

4.3.6. Determinación de las propiedades índice

Se determinaron en laboratorio las propiedades índice de las muestras de suelo con la finalidad de caracterizar los materiales de la zona de estudio, con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Se determinó la densidad de sólidos y el contenido natural de agua para cada muestra. Adicionalmente se determinaron los límites líquido y plástico, así como la granulometría de las muestras.

El peso volumétrico de las muestras se determinó de acuerdo con la norma ASTM D7263-09. El procedimiento de prueba consiste en labrar un cubo de suelo de dimensiones conocidas para sumergirlo en cera, para después determinar la masa sumergida del espécimen dentro de un volumen conocido (Ec.4.2).

$$\rho_m = \frac{M_t}{\left[\left(\frac{M_c - M_{sub}}{\rho_w} \right) + \left(\frac{M_c - M_t}{\rho_p} \right) \right]} \quad (4.2)$$

Donde M_t es la masa total del suelo en g, M_c es la masa de suelo recubierta de cera en g, M_{sub} es la masa de suelo encerado sumergido en g, ρ_w es la densidad del agua en g/cm³, ρ_p es la densidad de la cera en g/cm³.

La densidad de las partículas sólidas se determinó de acuerdo con la norma ASTM D854-02. Esta prueba se realiza con la finalidad de determinar las relaciones volumétricas y gravimétricas (Figura 4.17).



Figura 4.17. Determinación de la densidad de sólidos.

El análisis granulométrico por medio de tamices consiste en agitar una porción de suelo a través de un conjunto de mallas que tienen aberturas más pequeñas progresivamente. Para llevar a cabo este análisis fue necesario disgregar el material en el mortero para lograr que pase a través de las mallas.

Gracias al análisis previo, fue posible determinar que el material de la zona de estudio se compone principalmente de arenas.



Figura 4.18. Análisis granulométrico.

Para determinar el límite líquido de los suelos arenosos se utilizó el método de penetración de cono sueco, que consiste en un cono con un ángulo de vértice de 60° y una masa total de 60 gramos que inicialmente está suspendida. La prueba consiste en dejar que el cono caiga libremente durante un periodo de 5 segundos. El contenido de agua correspondiente a una penetración del cono de 10 mm define el límite líquido. Para llevar a cabo la prueba, el suelo se pasa por la malla No. 40 y se deja saturar material por 24 horas. Posteriormente, el suelo se coloca en un vidrio y se remoldea. La copa se llena con el material y se enrasa para obtener una superficie lisa. El cono se deja caer y la prueba se repite con diferentes contenidos de agua. Los resultados se grafican con el contenido de agua en la ordenada en escala logarítmica versus penetración del cono en la abscisa y se traza una línea recta que se ajuste mejor a la serie de datos. El límite líquido se lee en la gráfica como el contenido de agua correspondiente a una penetración de 10 mm. No fue posible determinar el límite plástico.



Figura 4.19. Límite líquido usando el cono sueco.

En la Tabla 4.6 se presenta el resumen de resultados de las pruebas índice realizadas en las muestras inalteradas extraídas del sondeo SPT-02 y del sondeo selectivo SS-01.

Tabla 4.6. Propiedades índice de las muestras ensayadas del sondeo SPT-2 y del sondeo selectivo SS-01.

Sondeo	Profundidad (m)		w (%)	IP (%)	Granulometría			Gs
					%G	%A	%F	
SPT-02	1.00	1.80	16.52	14.69	2.19	58.88	38.93	2.42
	2.50	3.30	14.91	4.01	12.96	51.98	35.06	2.50
	4.00	4.45	6.64	2.96	14.90	50.41	34.69	2.54
	5.50	5.75	17.81	5.77	14.22	44.15	41.63	2.52
	5.80	6.20	26.30	-	13.16	69.34	17.49	2.51
	8.60	8.80	37.36	-	17.62	54.40	27.99	2.51
	8.80	9.05	20.97	-	7.93	75.42	23.53	2.75
	13.10	13.20	21.19	-	6.30	70.16	23.53	2.59
	17.40	17.80	13.18	-	40.75	43.39	15.85	2.59
	17.80	18.80	19.23	-	8.04	84.88	7.09	2.59
22.40	23.40	17.18	-	10.64	80.91	8.45	2.58	
SS-01	1.00	1.60	18.60	-	19.69	79.61	0.7	2.55
	3.00	3.45	18.19	-	28.23	63.13	8.64	2.64
	6.00	6.30	19.26	-	16.36	67.09	16.55	2.66
	9.00	9.25	24.53	-	18.4	77.66	3.94	2.64
	11.00	11.25	15.38	-	11.56	80.24	17.2	2.66
	13.00	13.15	19.12	-	10.02	80.01	9.97	2.69

Nota: w= contenido natural de agua (%), IP= índice plástico (%), Gs= densidad de sólidos (g cm⁻³), G= grava (%), A=Arena (%), F= Finos (%)

La determinación de las propiedades índice en el sitio de estudio es fundamental, ya que se ha demostrado que tienen gran influencia en la determinación de las propiedades térmicas de los suelos.

4.3.7. Propiedades térmicas obtenidas en laboratorio en muestras de suelo

En el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se determinó con el Método de la Aguja Térmica la conductividad de seis muestras extraídas del sitio de estudio. El procedimiento de prueba se describe en el inciso 2.3. Las mediciones se realizaron por triplicado en intervalos de 15 minutos, y se utilizaron los sensores de aguja simple y aguja doble, obteniéndose así la capacidad calorífica volumétrica y la difusividad térmica, además de la conductividad térmica del suelo. En la Tabla 4.7 se presentan las propiedades térmicas del sitio obtenidas en el laboratorio.

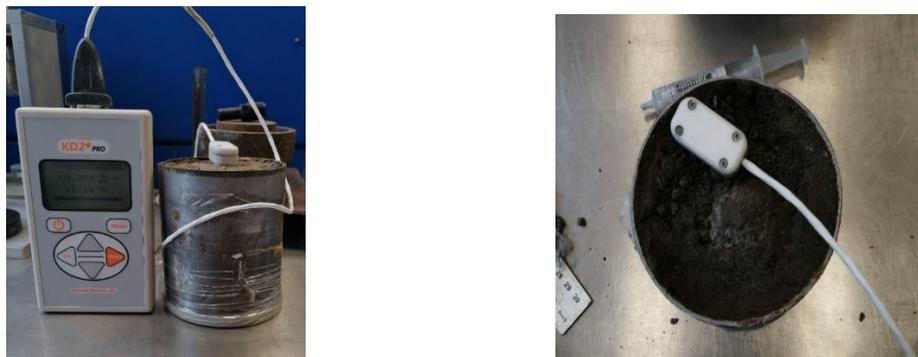
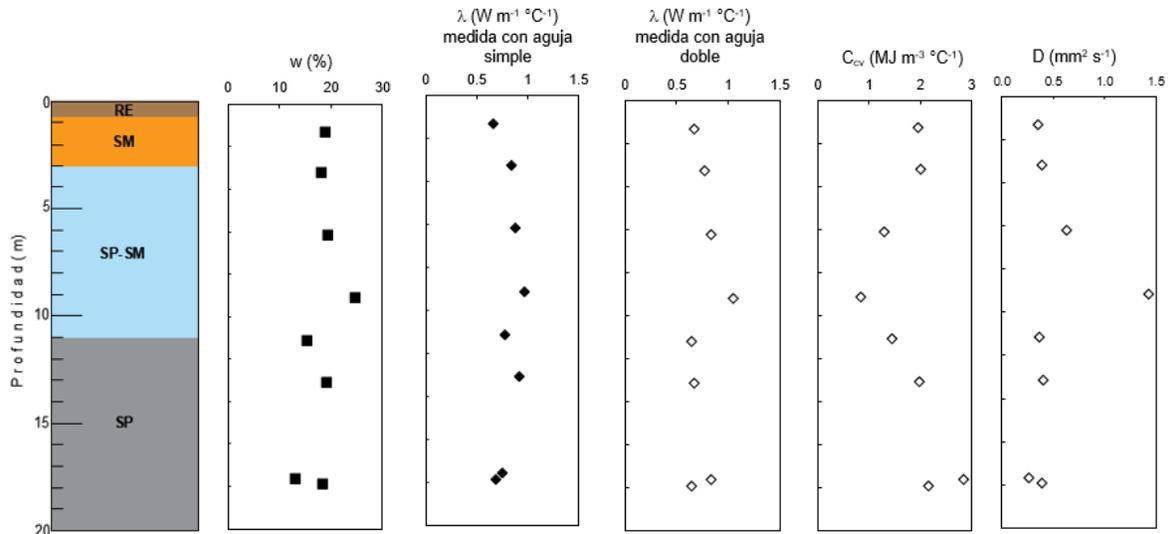


Figura 4.20. Medición de la conductividad térmica con el Método de la Aguja Térmica (equipo KD2 Pro del IIUNAM).

Tabla 4.7. Propiedades térmicas del suelo obtenidas en el laboratorio.

Profundidad (m)	Conductividad térmica λ		Capacidad calorífica volumétrica C_{cv} (MJ m ⁻³ °C ⁻¹)	Difusividad térmica, D (mm ² s ⁻¹)
	Aguja simple	Aguja doble		
	(W m ⁻¹ °C ⁻¹)			
1.00-1.60	0.645	0.667	1.938	0.344
3.00-3.45	0.837	0.769	2.022	0.383
6.00-6.30	0.876	0.824	1.314	0.627
9.00-9.25	0.965	1.053	0.842	1.422
11.00-11.25	0.779	0.636	1.471	0.365
13.00-13.15	0.920	0.681	1.989	0.398
17.40-17.80	0.745	0.824	2.852	0.252
17.80-18.00	0.638	0.650	2.163	0.380
22.40-23.40	0.640	0.633	-	-
	λ_s medio=0.806	λ_d medio=0.763	C_{cv} medio=1.824	D_{medio} =0.521

La conductividad térmica media obtenida en el laboratorio es de $\lambda_{media} = 0.784$ W m⁻¹ °C⁻¹. En la Figura 4.21 se presentan los perfiles de las propiedades térmicas del suelo del sitio de estudio en Naucalpan de Juárez (Estado de México), así como, el contenido de agua natural. Los primeros estratos presentan una conductividad térmica menor mientras que la profundidad media presenta propiedades térmicas más altas.



Nota: w = contenido de agua natural (%), λ = conductividad térmica del suelo ($W m^{-1} °C^{-1}$), C_{cv} = capacidad calorífica volumétrica ($MJ m^{-3} °C^{-1}$), D = difusividad térmica ($mm^2 s^{-1}$).

Figura 4.21. Perfil de las propiedades térmicas del suelo del sitio de estudio en Naucalpan de Juárez (Estado de México), obtenidas en el laboratorio.

4.3.8. Prueba TRT en un pozo de prueba en el subsuelo

(a) Perforación

Para el estudio de las propiedades térmicas de los suelos *in situ* se realizaron dos perforaciones a 20 m de profundidad y 15 cm de diámetro, separadas centro a centro 0.65 m (Figura 4.22). Una de las perforaciones corresponde al pozo para la prueba TRT (pozo de prueba PP) y la otra, al pozo de observación (PO).

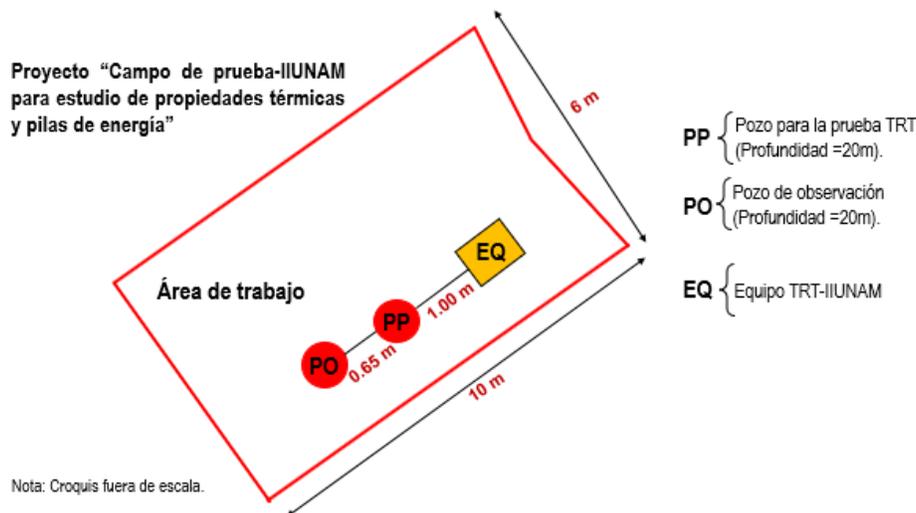


Figura 4.22. Ubicación de los pozos de prueba PP y de observación PO.

En la Figura 4.23 se ilustra el proceso de perforación de los pozos, el cual, se realizó con una maquinaria Longyear 38. Para la estabilización de la pared de los pozos (antes de la colocación del material de relleno) se utilizó una mezcla de bentonita.



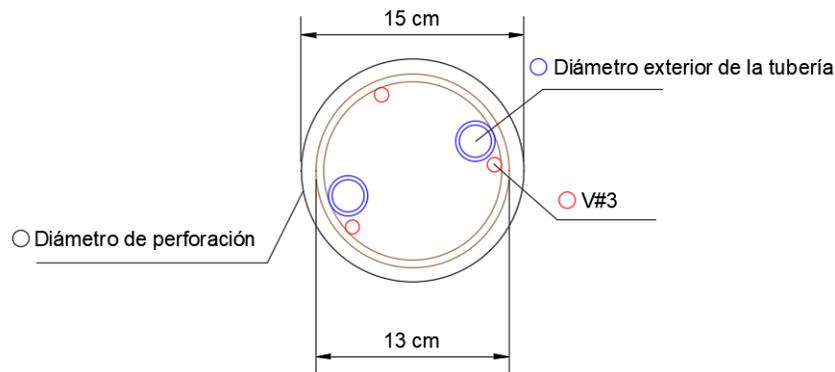
(a) Colocación de la tubería de perforación



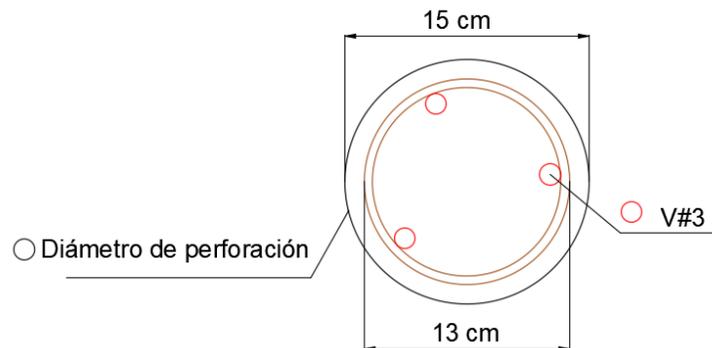
(b) Broca tricónica

Figura 4.23. Perforación del pozo de prueba.

De manera simultánea al proceso de perforación, se realizó la colocación de la tubería de polietileno de alta densidad y los sensores Pt 100 en un armado rígido de 3 varillas con estribos a cada 40 cm como se muestra en la sección transversal del armado de la Figura 4.24.



(a) Armado y ubicación de la tubería (un bucle en U) del pozo de prueba



(b) Armado del pozo de observación

Figura 4.24. Sección transversal de los pozos para la prueba TRT en el sitio del Estado de México.

4. Ejecución de ensayos de respuesta térmica en México con el equipo TRT-IIUNAM

Una vista en corte del arreglo *in situ* de los pozos de prueba y de observación se ilustra la Figura 4.25. En el interior del pozo de observación para el monitoreo de la temperatura del suelo se instalaron 7 sensores Pt 100 clase A, a diferentes profundidades (1.5 m, 3.0 m, 4.5 m, 6.0 m, 9.0 m, 13.5 m y 18.0 m). Este pozo se rellenó con un material de lechada a base de cemento, arena sílica y grafito amorfo. Por su parte, en el pozo de prueba se instaló una tubería de polietileno de alta densidad (PEAD) color negro de 3/4" de diámetro nominal. Al final de la tubería se dio un acabado de bucle en forma de U.

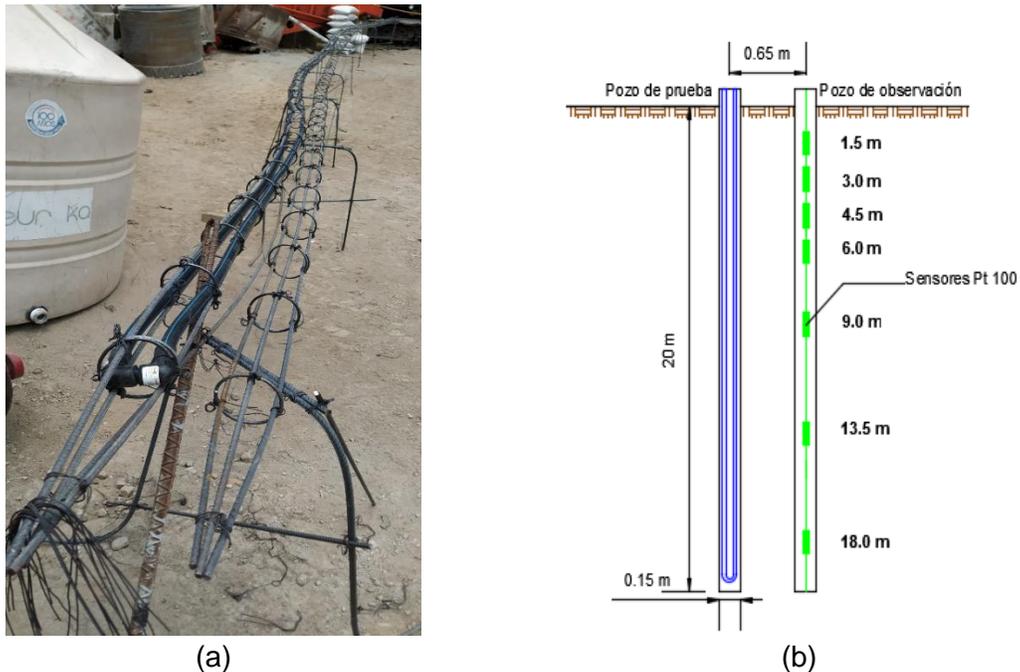


Figura 4.25. a) Armado rígido para el pozo de prueba y pozo de observación; b) Vista en corte del arreglo *in situ* del pozo de prueba y pozo de observación.

El izaje de los armados de los pozos se realizó con ayuda de una grúa. Posteriormente, personal en campo los hincó en posición vertical. Los detalles de la instalación del armado dentro de los pozos se presentan en la Figura 4.26. El bucle en U se instaló al final de la longitud total de la perforación.



(a) Colocación de los sensores Pt 100 en el armado para el pozo de observación (b) Tubería PEAD con bucle en forma de U

Figura 4.26. Implementación de los pozos de observación y de prueba.



(c) Izaje del armado rígido



(d) Colocación del armado en el pozo



(e) Armado con tubería tipo PEAD



(f) Pozo con tubería tipo PEAD

Figura 4.26. (continuación) Implementación de los pozos de observación y de prueba.

(b) Mezcla para el relleno de los pozos de observación y de prueba

Para la ejecución de la prueba TRT se requiere de un relleno (con alta conductividad térmica) para el pozo de prueba. De acuerdo con lo señalado en el Inciso 2.4.3 las mezclas convencionales de bentonita y agua no garantizan valores de conductividad térmica mayores que $1.0 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$. Por lo tanto, se deben diseñar mezclas mejoradas térmicamente con adición de agregados como arena sílica y grafito amorfo. Previo a la ejecución de la prueba TRT *in situ* se evaluaron experimentalmente en el Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería (IIUNAM) veintiocho mezclas con diferentes proporciones de bentonita, agua, cemento (Portland tipo II compuesto - CPC), arena sílica y un aditivo a base de carbono: grafito amorfo; con la finalidad de identificar la mezcla adecuada para su uso como relleno de perforación en el pozo de la prueba TRT. También se determinaron en laboratorio la viscosidad, trabajabilidad (a partir de la prueba de revenimiento) y la conductividad térmica de las mezclas propuestas como relleno de perforación para la ejecución del ensayo de respuesta térmica TRT en el sitio del Estado de México (Anexo B). Con base en los resultados experimentales obtenidos, se determinó que las mezclas realizadas con cemento y agregados de arena sílica y grafito amorfo poseen conductividades térmicas mayores que $1.5 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ con revenimientos entre 15 y 23 cm. Por lo que, estas mezclas son las que se consideran ideales para utilizarse como relleno en los del ensayos TRT.

4. Ejecución de ensayos de respuesta térmica en México con el equipo TRT-IIUNAM

Para el control de calidad de la mezcla en campo se llevaron a cabo las actividades de la Tabla 4.8.

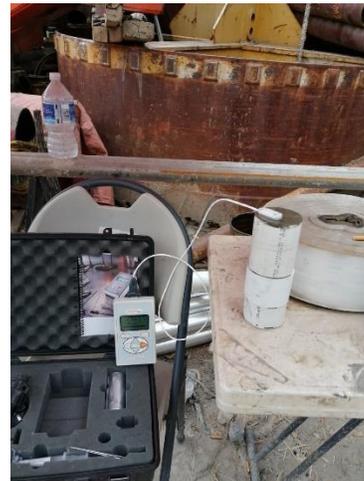
Tabla 4.8 Control de calidad para la mezcla de relleno en la prueba TRT.

PRUEBA	FRECUENCIA
Revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE)	Cuatro muestras de probeta por cada seis metros cúbicos de concreto y en el sitio de descarga.
Peso volumétrico (NMX-C-162)	Una vez por día de colado, pero no menos de una por cada 20 m ³ .
Conductividad térmica (ASTM D 5334-14)	Mediciones triplicadas y separadas por intervalos de 15 minutos en cada una de las probetas en el sitio de descarga y 28 días después.

Debido a la consistencia de la mezcla seleccionada para el relleno del pozo de prueba no fue necesario realizar pruebas de revenimiento porque el material fue bombeado a través de un poliducto instalado en toda la longitud del armado rígido. La conductividad térmica de la mezcla elaborada *in situ* para el relleno del pozo de la prueba TRT, se determinó en seis probetas de 7.5 cm de diámetro y 20 cm de longitud. Se realizaron en el sitio tres mediciones separadas por intervalos de 15 minutos y una medición 28 días después de realizada la mezcla en campo. La conductividad térmica obtenida de la mezcla para el relleno del pozo de prueba fue de $\lambda = 1.722 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$.



(a) Llenado de las probetas con la mezcla elaborada *in situ*



(b) Medición *in situ* de la conductividad térmica con el sensor de aguja simple

Figura 4.27. Medición de la conductividad térmica en campo.

(c) Montaje del equipo TRT-IIUNAM en campo y ejecución de la prueba

Una vez que se disiparon las perturbaciones térmicas a causa de la colocación del material de relleno en el pozo de prueba, se trasladó el equipo TRT-IIUNAM al sitio, para colocarlo a 1.5 m de distancia de las tuberías sobresalientes del pozo de prueba (para su correcta conexión al equipo TRT-IIUNAM, Figura 4.28).



Figura 4.28. Equipo TRT-IIUNAM en campo.

La prueba se llevó a cabo del día 20 de abril al 27 de abril de 2021. Antes de comenzar se revisaron los dispositivos del circuito interno de funcionamiento para descartar algún daño ocasionado por el traslado del equipo. Las tuberías sobresalientes del pozo de prueba se cubrieron con polietileno expandido como aislante térmico (Figura 4.29a). Posteriormente, para medir la temperatura media del suelo se bajó manualmente un sensor de temperatura Pt 100 dentro de la tubería llena de agua (Figura 4.29b). El sensor está marcado a cada metro desde el vástago de platino, para facilitar la medición de las temperaturas a distintas profundidades. En la Figura 4.30 se muestra el perfil de temperatura del suelo medido con el sensor Pt 100. La temperatura media obtenida fue $T_m = 22.8^{\circ}\text{C}$. Generalmente, la temperatura de los primeros cinco metros está influenciada por las condiciones ambientales. A mayor profundidad la temperatura disminuye y tiende a hacerse constante y aproximadamente igual a la temperatura media ambiente del sitio.



(a) Colocación del polietileno expandido (aislante térmico de las tuberías)



(b) Medición de la temperatura media del suelo con el sensor Pt 100

Figura 4.29. Preparación de las tuberías para la prueba TRT.

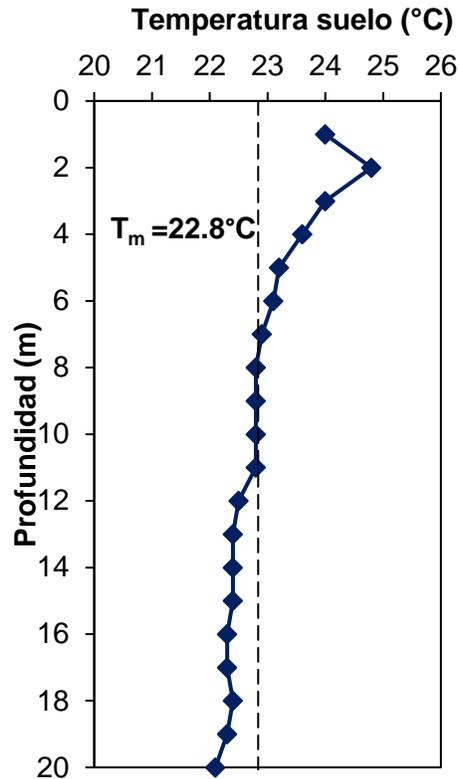


Figura 4.30. Perfil de la temperatura media del suelo del sitio de estudio.

Después de medir la temperatura del suelo se extrajo el sensor Pt 100 de la tubería y se conectó directo al equipo TRT-IIUNAM. Se revisaron una vez más todos los elementos del equipo, y se conectó el equipo a la energía eléctrica. Posteriormente, se encendió la bomba hidráulica dando inicio a la circulación de agua dentro de las tuberías.



Figura 4.31. a) Conexión de las tuberías del pozo de prueba al equipo TRT-IIUNAM; b) Revisión de los sensores dentro del equipo TRT-IIUNAM.

Durante aproximadamente 40 minutos se dejó circular el agua con ayuda de la bomba hidráulica, midiendo las temperaturas de entrada y de salida del pozo, a intervalos de 10 segundos. En la Figura 4.32 se presenta la gráfica obtenida con estas mediciones. Se

puede observar que la temperatura inicial de salida del fluido es de 21.82°C, mientras que la temperatura inicial de entrada es mayor 22.12°C, esto quiere decir que el agua de entrada se encuentra en equilibrio térmico con el medio (suelo) ya que su valor es parecido a la temperatura media del suelo $T_m = 22.88^\circ\text{C}$, además se presentó un aumento de la temperatura de aproximadamente 2.5°C, lo que indica que la bomba tiende a aportar calor durante la circulación del fluido.

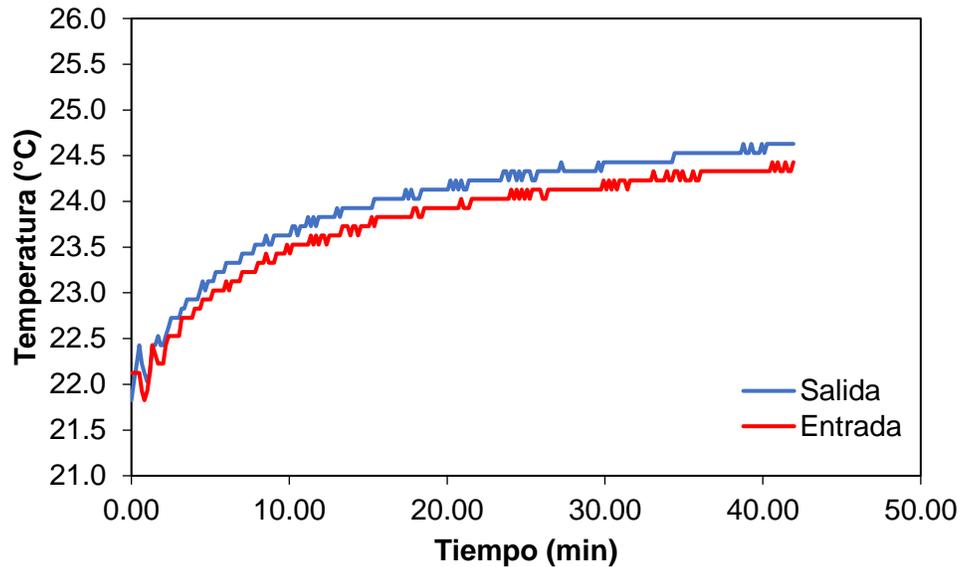


Figura 4.32. Temperaturas iniciales del fluido (agua) medidas a la entrada y salida del pozo de prueba durante aproximadamente 40 minutos.

Después de determinar la temperatura media del suelo se dio inicio a la prueba TRT. Todos los dispositivos se conectaron al cuadro eléctrico que tiene una pantalla PLC donde se observan en tiempo real los valores que se van registrando de las temperaturas de entrada y salida, la presión y el flujo de agua dentro del sistema. Los datos se almacenan en una memoria USB externa. El equipo TRT-IIUNAM también permite observar en tiempo real la cantidad de energía suministrada con ayuda de un medidor de factor de potencia, voltaje, energía y corriente (Figura 4.33).

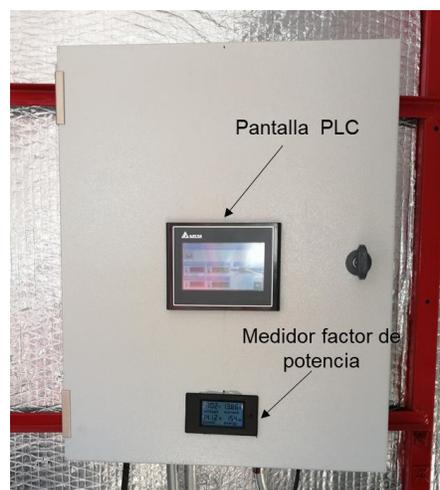


Figura 4.33. Caja de control del equipo TRT-IIUNAM.

La frecuencia de obtención de los datos fue a cada 10 segundos de manera simultánea (la temperatura de entrada y salida, presión y flujo de agua dentro del sistema, etc.). La potencia por unidad de longitud suministrada al pozo de prueba fue de aproximadamente 65 W/m. En este sitio el ensayo TRT tuvo una duración de 160 horas, que incluyó una etapa de calentamiento y una etapa de recuperación. La potencia de calentamiento nominal fue de 1 307 Watts y el flujo de agua en la tubería de 18.065 lpm. El registro de las temperaturas de entrada y salida en la etapa de calentamiento se muestra en la gráfica de la Figura 4.34.

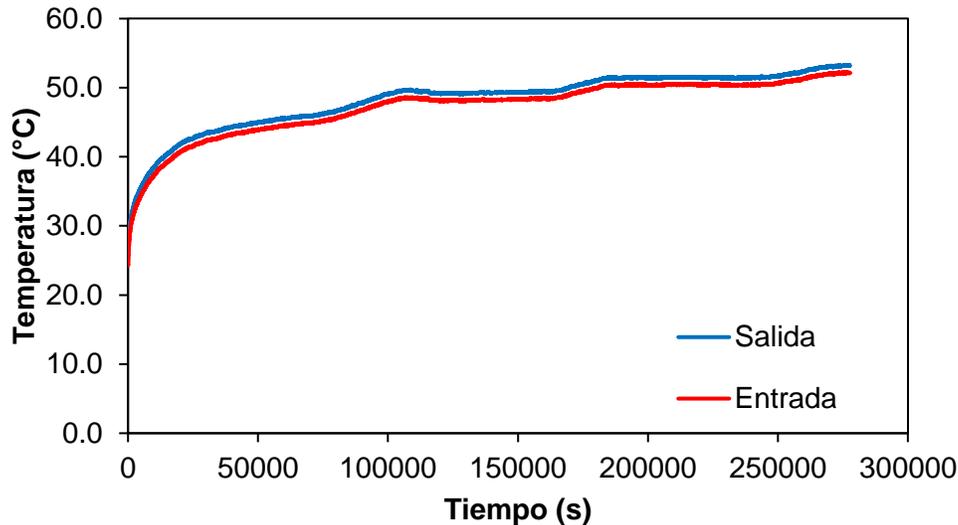


Figura 4.34. Registro de temperaturas de entrada y de salida del fluido en la *etapa de calentamiento* de la prueba TRT.

Durante los días de prueba se observó un incremento brusco de la temperatura que alcanzó más de 50°C, el cual, se asoció a las características del suelo del sitio de estudio y a la interacción de las tuberías del equipo con el medio ambiente. Después de 80 horas de calentamiento, se apagó el calentador del equipo TRT-IIUNAM y se dejó circulando el fluido portador de calor por 80 horas más, lo que dio inicio a la *etapa de recuperación*.

En la gráfica de la Figura 4.35, se observa que la etapa de recuperación presenta *picos* de temperatura, los cuales, se deben a la interacción de las tuberías del equipo con el medio ambiente. Cabe resaltar que en el sitio de la prueba se distinguieron cambios bruscos de la temperatura ambiente durante el día y la noche.

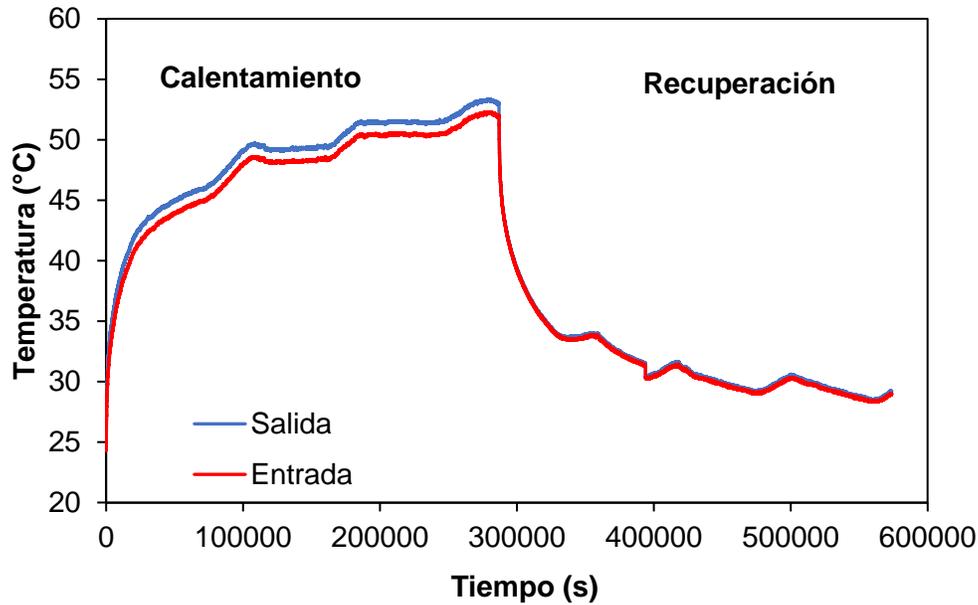


Figura 4.35. Registro de temperaturas de entrada y de salida del fluido en las etapas de calentamiento y recuperación de la prueba TRT en el Estado de México.

Durante la etapa de calentamiento y recuperación el caudal hidráulico se mantuvo casi constante en aproximadamente en $1.084 \text{ m}^3/\text{h}$ y la energía del calentador en la etapa de calentamiento fue de 1307 Watts lo que da un equivalente de una tasa de calor inyectada por metro de $q = 65.35 \text{ W/m}$ como se muestra en la Figura 4.36.

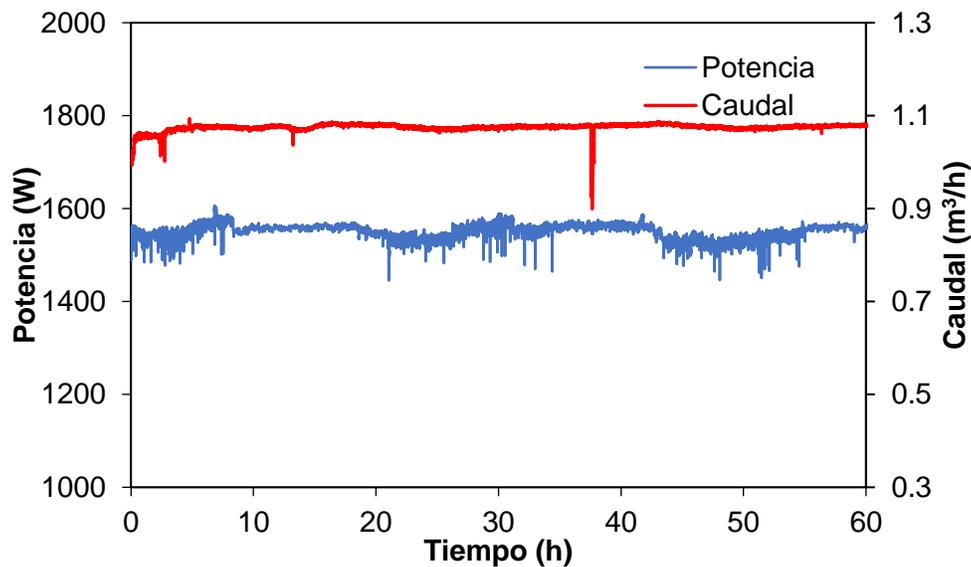


Figura 4.36. Registros de la variación de la tasa de potencia y caudal hidráulico durante la prueba TRT.

La conductividad térmica del sitio se determinó con el método analítico de la fuente lineal infinita descrito en el Inciso 2.5.1. Para la etapa de calentamiento se descartaron las primeras 25 horas y se graficó el cambio de temperatura contra el logaritmo del tiempo, como se muestra en la Figura 4.37. De igual forma, en la Figura 4.38 se presentan los

cambios de temperatura contra el logaritmo del tiempo para la *etapa de recuperación*. En las gráficas correspondientes el valor de la pendiente de la recta a la curva corresponde a la conductividad térmica del sitio, para las etapas de calentamiento ($\lambda_{\text{calentamiento}} = 0.778 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) y recuperación o enfriamiento ($\lambda_{\text{enfriamiento}} = 0.778 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), respectivamente. Con lo anterior, se estima una conductividad térmica media del sitio de $\lambda_{\text{media}} = 0.822 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

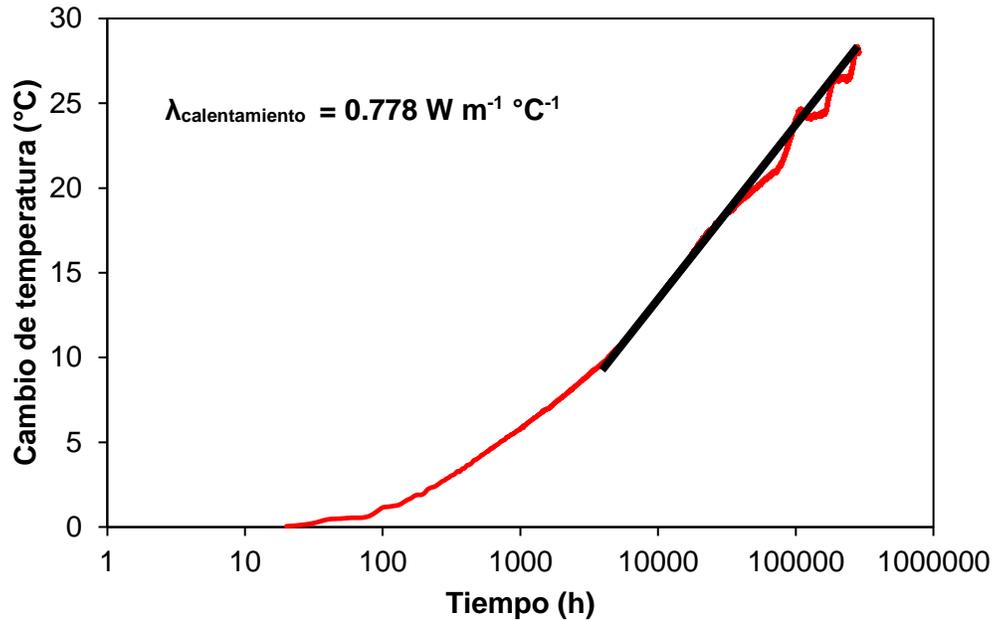


Figura 4.37. Conductividad térmica obtenida en la *etapa de calentamiento*.

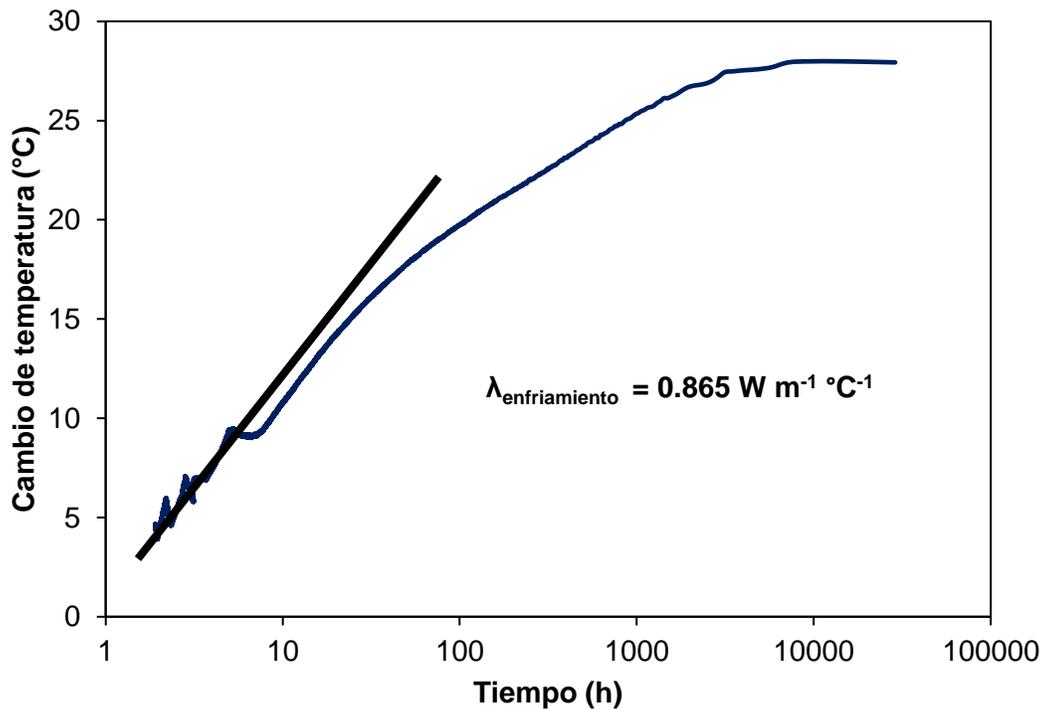


Figura 4.38. Conductividad térmica obtenida en la *etapa de recuperación*.

4. Ejecución de ensayos de respuesta térmica en México con el equipo TRT-IIUNAM

La conductividad térmica media del sitio obtenida a partir de la prueba la prueba TRT ($\lambda_{media} = 0.822 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) resultó un poco más alta que la conductividad media obtenida con el Método de la Aguja Térmica en el laboratorio ($\lambda_{media} = 0.784 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). En general, las conductividades térmicas obtenidas en el sitio de estudio (tanto en campo como en laboratorio) son bajas en comparación con los resultados presentados en la literatura internacional para materiales similares. Lo anterior, indica que el suelo del sitio de prueba es un medio que conduce muy poco el calor, lo que puede atribuirse a las características físicas y mineralógicas del material. Por este motivo, resulta importante poner atención al estudio de las propiedades mineralógicas del suelo donde se pretenden construir estructuras termoactivas.

4. Ejecución de ensayos de respuesta térmica en México con el equipo TRT-IIUNAM

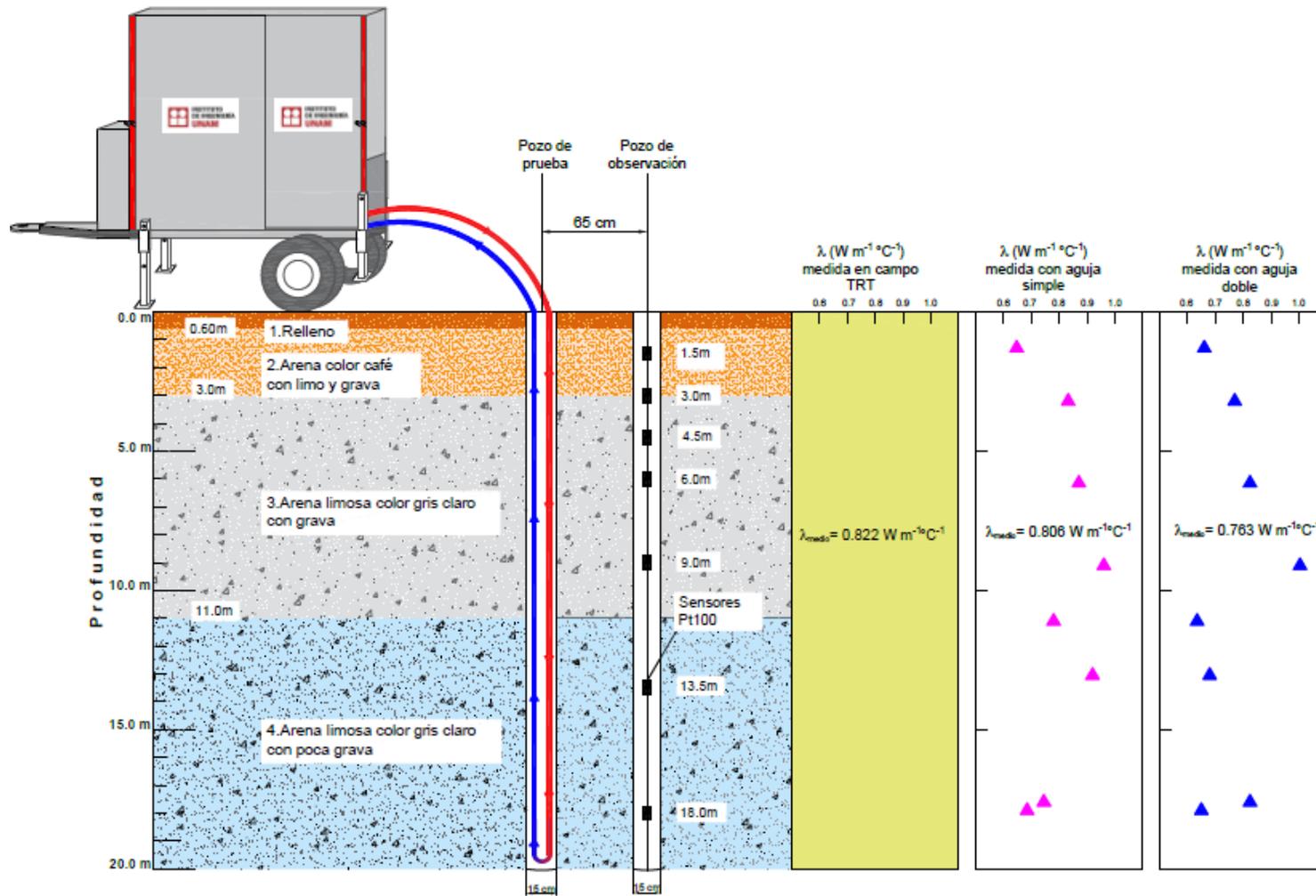


Figura 4.39. Representación esquemática de los resultados obtenidos con el ensayo TRT *in situ* y las pruebas con la aguja térmica (simple y doble)

(d) Pozo de observación

Conocer la variación de la temperatura del suelo en función del tiempo es fundamental para el diseño de sistemas cerrados de BCG, ya que proporciona mayor cantidad de información para la estimación de la conductividad térmica y la capacidad del suelo para transferir calor.

(d.1) Temperatura inicial del suelo

La Figura 4.40 muestra la distribución de la temperatura inicial del suelo en el sitio de estudio registrada a cada metro de profundidad del pozo de prueba con un sensor Pt 100 antes del inicio de la prueba TRT. En la misma figura se incluye la temperatura inicial medida con ayuda de siete sensores Pt 100 instalados en el pozo de observación (que está a 0.65 m de distancia del centro del pozo de prueba). Los siete sensores Pt 100 se localizan a las siguientes profundidades 1.5m, 3.0m, 4.0m, 6.0m, 9.0m, 13.5m y 18.0m, respectivamente.

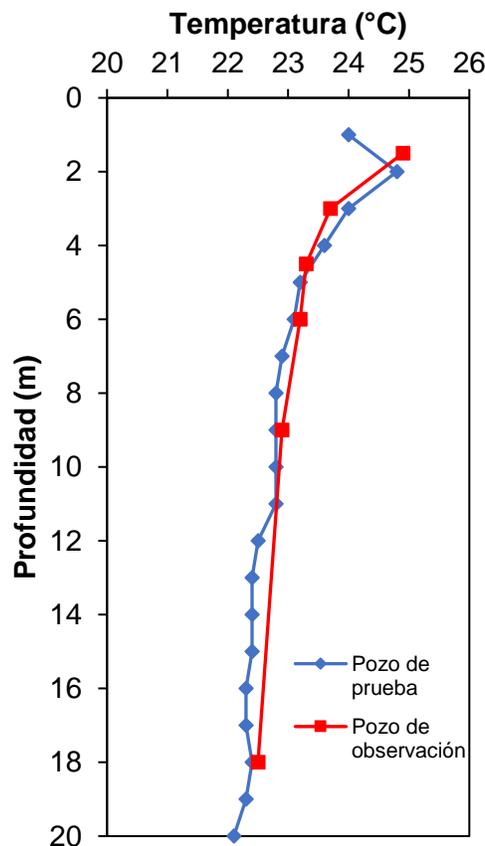


Figura 4.40. Variación inicial de la temperatura inicial del suelo con la profundidad, medida el 20 de abril de 2021.

En la Figura 4.40 anterior, se observa que la temperatura del suelo medida con los sensores Pt 100 en el pozo de observación es similar a la temperatura medida a cada metro dentro de las tuberías del pozo de prueba. Sin embargo, hubo problemas con el sensor de temperatura instalado a 13.5 m de profundidad dentro del pozo de observación, por lo que no se presentan estos datos. La prueba TRT en el sitio de estudio comenzó un mes después de iniciada la primavera. Los efectos atmosféricos influyen en la temperatura superficial del

suelo. En la Figura 4.40 se distingue que la temperatura de 0 a 3 m es más alta que la temperatura a mayor profundidad (3 a 20 m). Las temperaturas medidas por debajo de 6 m de profundidad son relativamente constantes, oscilando entre 22.8°C y 23.1°C.

(d.2) Variación de la temperatura del suelo

Las variaciones de la temperatura del suelo medidas en el pozo de observación durante 160 horas (aproximadamente siete días) se muestran en la Figura 4.41. En la misma, se distingue que las pendientes del aumento de temperatura de suelo comenzaron a cambiar a 30 h de iniciada la prueba TRT. El cambio de pendiente más pronunciado se observó a 1.5 m de profundidad, debido a que la temperatura del suelo en la parte menos profunda está influenciada de manera significativa por las condiciones climáticas de la zona.

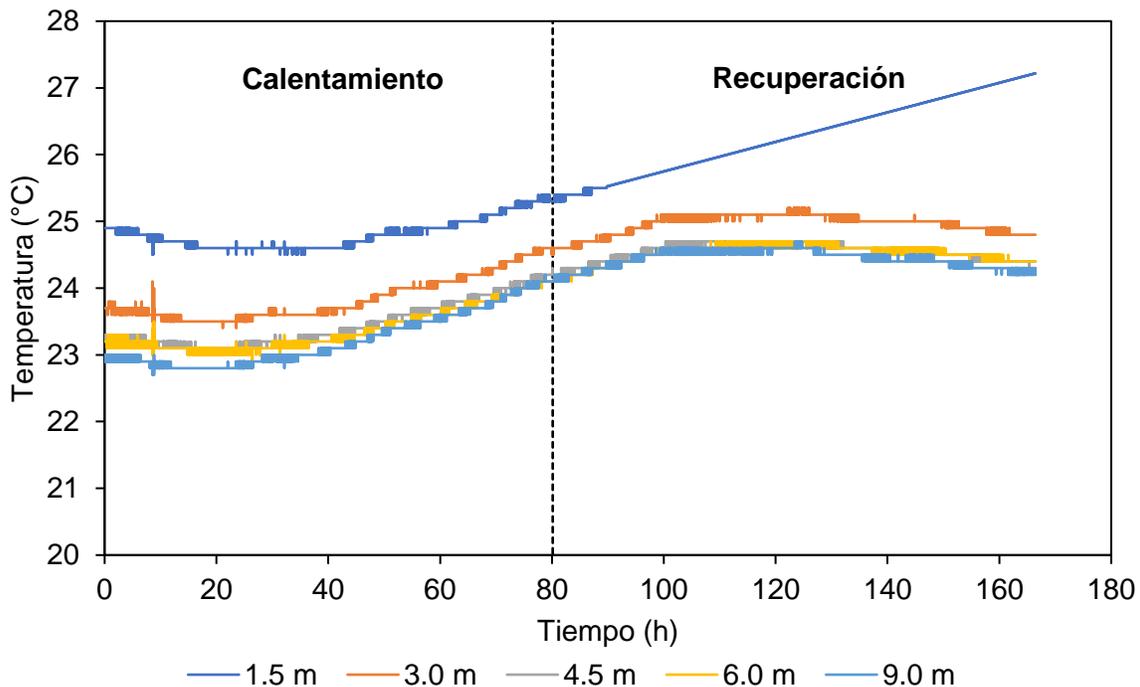


Figura 4.41. Evolución de la temperatura del suelo durante la prueba TRT medida a distintas profundidades en el pozo de observación (80 h de calentamiento y 80 h de recuperación o enfriamiento).

En la Figura 4.41 también se observa que, al término de la *etapa de calentamiento* (80 horas) los sensores continuaron registrando un aumento de la temperatura del suelo debido a la perturbación térmica ocasionada por la prueba TRT. El decremento de la temperatura del suelo en la *etapa de recuperación o enfriamiento* comienza a distinguirse después de aproximadamente transcurridas 120 o 130 horas de la prueba, a excepción del sensor ubicado a 1.5 m de profundidad, el cual continuó registrando aumento de la temperatura del suelo superficial debido a la influencia de las condiciones climáticas de la zona.

Por otra parte, en la Figura 4.42 se proporciona la variación de la temperatura del suelo con la profundidad medida en los sensores del pozo de observación en 160 h de duración de la prueba TRT. A las 80 horas (etapa de calentamiento) de transcurrida la prueba, los incrementos de temperatura del suelo registrados en el pozo de observación son 25.6°C, 24.8°C, 24.5°C, 24.4°C, 24.4°C, 24.6°C para 1.5 m, 3.0 m, 4.5 m, 6.0 m, 9.0 m y 18 m,

respectivamente. La temperatura máxima de 25.6°C se encontró a 1.5 m de profundidad y la temperatura mínima de 24.4°C a 9.0 m de profundidad. Durante la *etapa de recuperación* los sensores continuaron registrando un incremento de temperatura, después de transcurridas aproximadamente 120 o 130 horas, la temperatura del suelo comenzó a recuperarse.

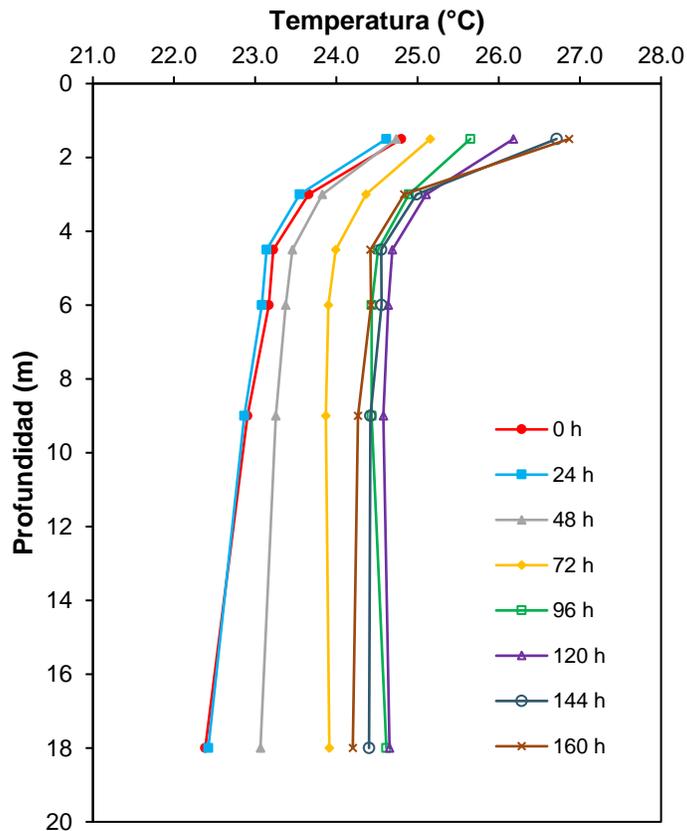


Figura 4.42. Variación de la temperatura del suelo con la profundidad a 65 cm de distancia al centro del pozo de prueba.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio, descritos en el Inciso 4.3.7 las propiedades térmicas del suelo a partir de 3.0 m y hasta aproximadamente 13.5 m de profundidad presentan las conductividades y difusividades térmicas más altas del suelo analizado, por lo que, el calor inyectado en el pozo de prueba se conduce más fácilmente de 3.0 a 13.5 m de profundidad. El suelo cerca de la superficie es menos conductor y tiende a acumular el calor alrededor del pozo además es más susceptible a los cambios de temperatura debidos al clima. En efecto, de acuerdo con Guo *et al.*, (2018) la temperatura más baja del suelo debe ocurrir en las capas de suelo con mayor conductividad térmica, bajo la suposición de que la transferencia de calor es principalmente en dirección radial.

Adicionalmente, durante la prueba de respuesta térmica también se monitoreó la temperatura del ambiente dentro y fuera del equipo TRT-IIUNAM, con ayuda de un sensor DHT-22 (adentro) y un sensor Pt 100 (afuera), respectivamente. En la Figura 4.43 se presentan las temperaturas medidas. Se aprecia que, la temperatura dentro del equipo TRT-IIUNAM es mayor que la temperatura ambiente de la zona, esto indica que a pesar del aislante térmico incluido dentro del equipo (en las partes interiores), existe transferencia de

calor de las tuberías hacia el exterior. Además, se observa que existen cambios bruscos de temperatura en el sitio de estudio, como lo registró el sensor Pt 100 colocado en el exterior del equipo.

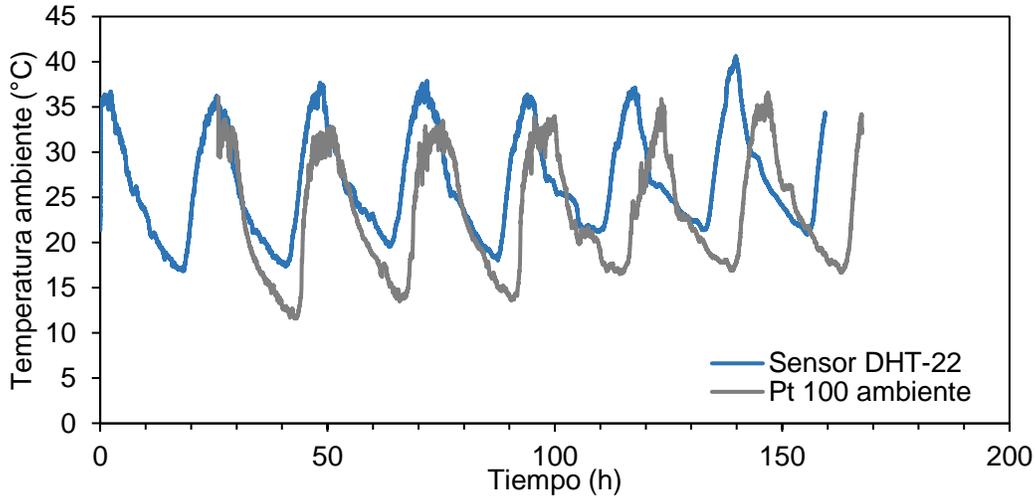


Figura 4.43. Temperatura del ambiente dentro (sensor DHT-22) y fuera (sensor Pt 100) del equipo TRT-IIUNAM durante 160 h de duración de la prueba.

(e) Recuperación de la temperatura del suelo

Después de finalizada la prueba TRT se continuó monitoreando la temperatura ambiente y la temperatura del suelo a diferentes profundidades con ayuda de los sensores Pt 100 que están dentro del pozo de observación. La temperatura ambiente de la zona se monitoreó durante 54 días (período del 27 de abril al 28 de junio de 2021). La Figura 4.44 muestra la variación de la temperatura ambiente en el sitio de prueba durante 54 días, estimándose una temperatura media $T_m = 19.76^\circ\text{C}$. Después de finalizar la prueba el 27 de abril de 2021 (después de 160 horas de prueba) la temperatura dentro del suelo fue disminuyendo y de acuerdo con los registros que se obtuvieron después de transcurridas 144 horas de finalizada la prueba, el suelo comenzó a recuperar su temperatura inicial. Cabe señalar que el suelo no recupera al 100% la temperatura inicial medida antes del comienzo de la prueba TRT.

En la Figura 4.45 se presenta la influencia de la temperatura ambiente (medida al medio día) sobre el suelo a diferentes profundidades. Se observa que la radiación solar afecta principalmente hasta 1.5 m de profundidad, además que, entre las 1080 y las 1272 horas la temperatura del suelo tiende a ser constante. El registro de las temperaturas se realizó durante la primavera y principios del verano en el hemisferio norte.

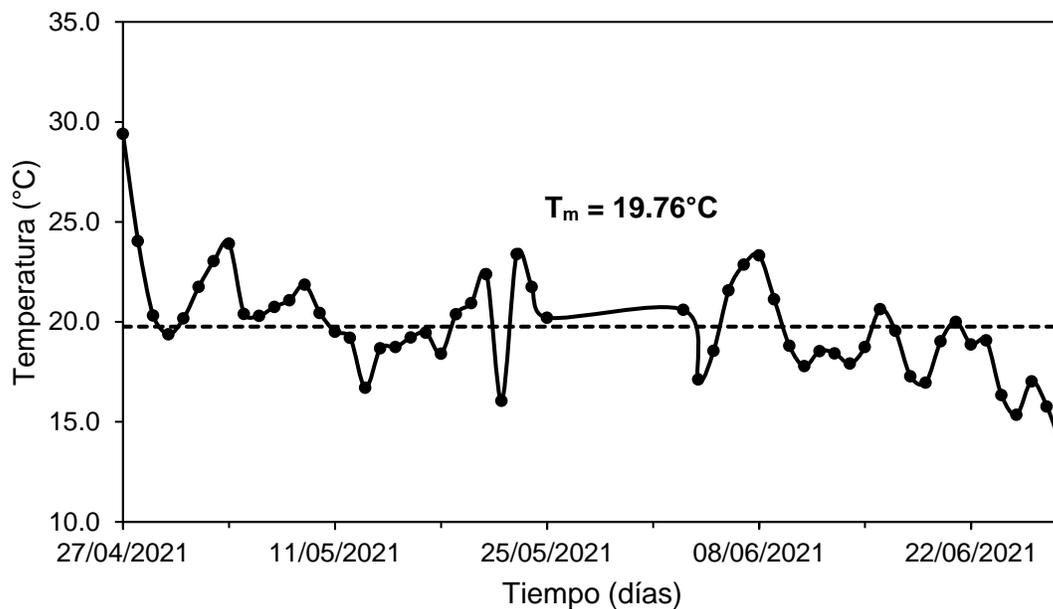


Figura 4.44. Temperatura del ambiente medida en el periodo del 27 de abril al 28 de junio de 2021.

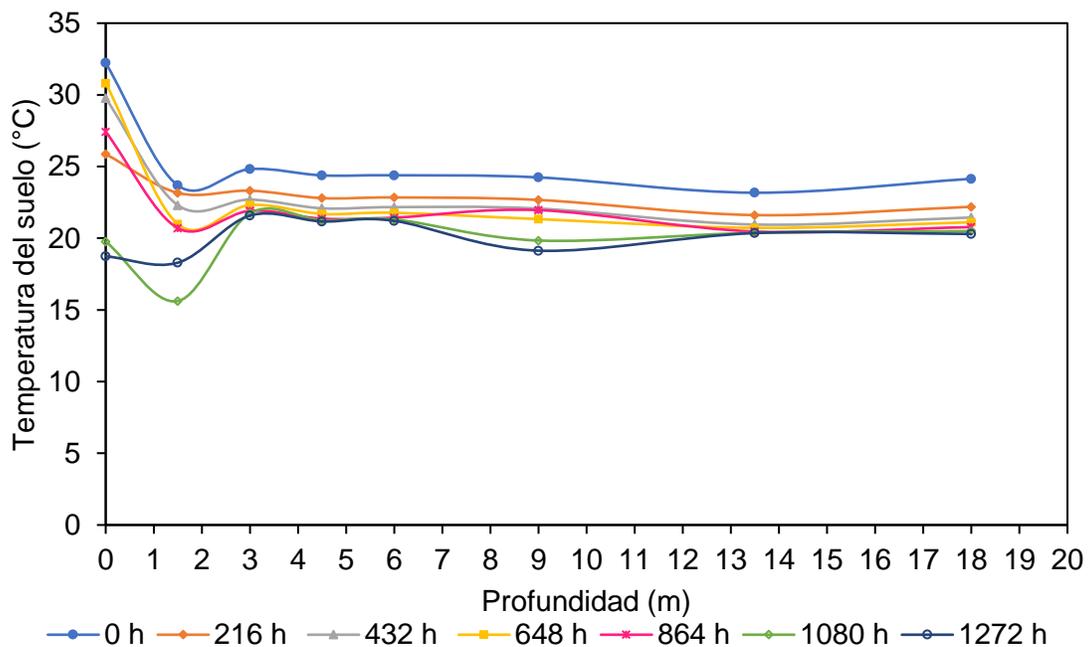


Figura 4.45. Influencia de la temperatura ambiente (medida al medio día) en la temperatura del suelo a diferentes profundidades.

En la Figura 4.46 se muestra la evolución de la temperatura del suelo durante los meses de abril, mayo y junio; las lecturas se realizaron diariamente de las 12:00 a las 15:00 h. Inicialmente, la temperatura del suelo en la superficie era más alta que en la zona más profunda. Lo que quiere decir que durante la primavera y principios del verano el calor se

4. Ejecución de ensayos de respuesta térmica en México con el equipo TRT-IIUNAM

transfiere desde la superficie. Para los meses subsecuentes se espera que el calor comience a transferirse del suelo a la superficie.

La Figura 4.47 muestra las fluctuaciones de la temperatura del suelo desde el inicio de la prueba TRT el día 20 abril de 2021 hasta el día 28 de junio de 2021, lo que da un total de 60 días. Se muestran fluctuaciones irregulares de temperatura sobre todo aproximadamente a 1.5 m de profundidad. Conforme pasaron los días las fluctuaciones cesan gradualmente.

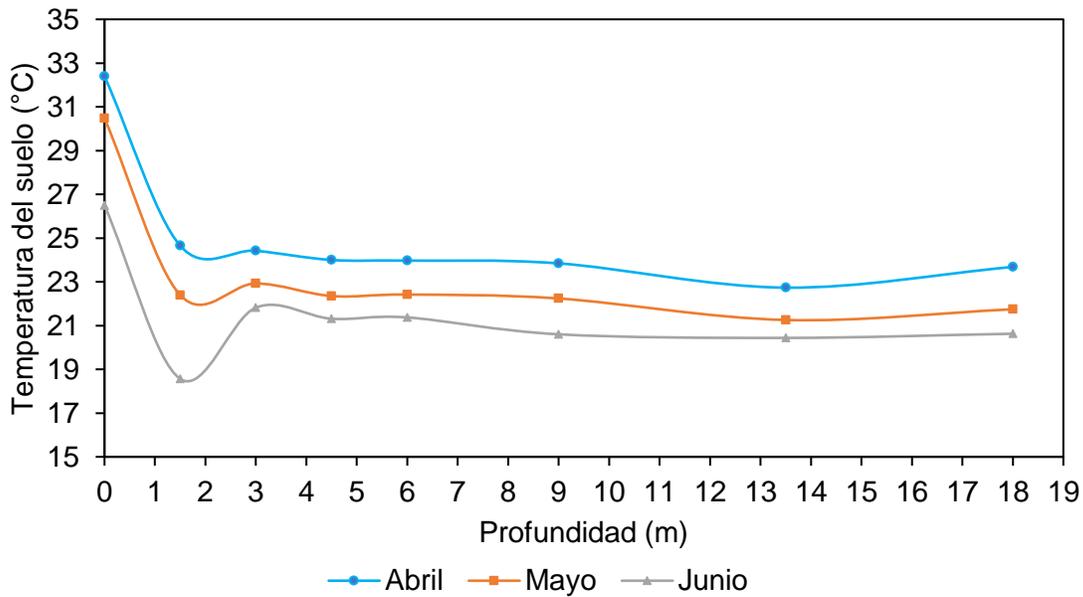


Figura 4.46. Distribución de la temperatura del suelo en primavera y verano de 2021.

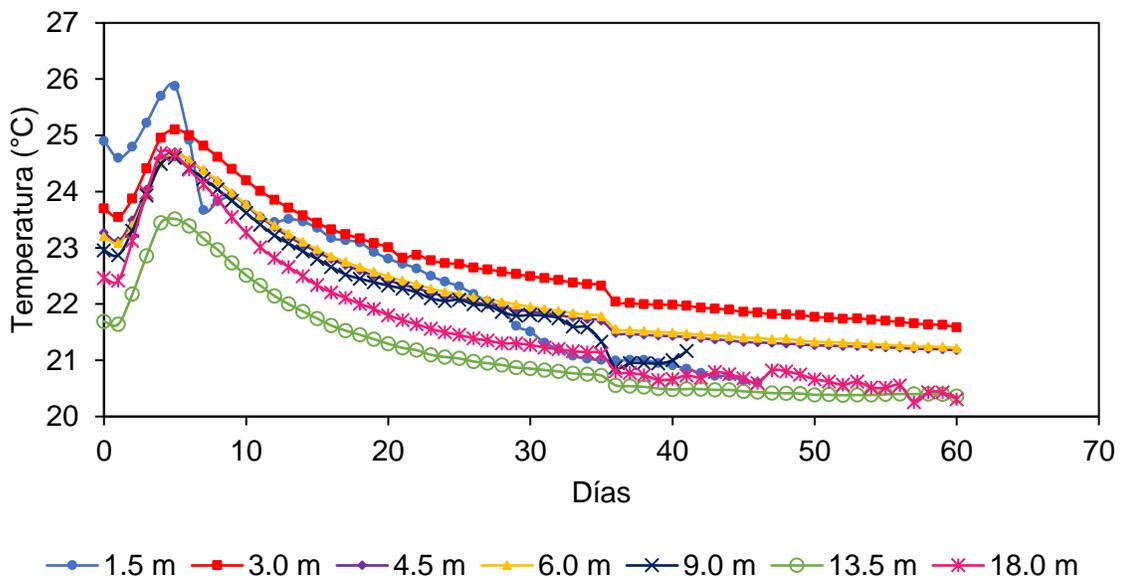


Figura 4.47. Fluctuación de la temperatura del suelo a distintas profundidades durante 60 días

5. CONCLUSIONES GENERALES

El presente trabajo se dividió en dos partes generales, la primera dedicada al diseño, construcción, calibración y puesta en marcha de un equipo móvil de respuesta térmica (denominado TRT-IIUNAM) para la determinación de las propiedades térmicas de los suelos nacionales. La segunda parte, dedicada a la determinación experimental mediante el método estacionario de Ensayo de Respuesta Térmica (TRT, del inglés Thermal Response Test) de las propiedades térmicas en dos sitios de interés, uno ubicado al poniente de la CDMX y el otro al noreste del Estado de México. En estos dos sitios, los ensayos TRT se realizaron en una pila de energía (CDMX) y en el subsuelo (Estado de México), respectivamente.

El equipo TRT-IIUNAM implementado permitió obtener resultados confiables tanto para pruebas de corta como de larga duración. Los resultados de la primera prueba TRT ejecutada en una pila de energía permitieron realizar mejorías al equipo, como la colocación de un tanque de expansión para absorber la presión que se genera en el circuito cuando se calienta el agua. También se agregó al equipo un mejor sistema de adquisición de datos que no requiere del monitoreo constante durante la prueba. Existen mejorías adicionales que todavía se pueden realizar, como el aislamiento térmico de las tuberías dentro del equipo, también el uso de un medidor de flujo electromagnético que no bloquee el flujo, y llegue a provocar caídas de presión o errores o inconsistencias en la medición. Cabe señalar que este equipo es el primero construido e implementado para realizar pruebas de respuesta térmica TRT en México.

La primera prueba TRT (al poniente de la CDMX) con el equipo móvil diseñado, construido, calibrado y puesto en marcha en el IIUNAM, tuvo una duración de 60 h, por lo que se consideró como una prueba de corta duración. Los resultados de esta prueba se procesaron e interpretaron con un modelo analítico transitorio propuesto por Loveridge *et al.* (2013). Los registros de campo permitieron corroborar que el caudal hidráulico y el flujo de calor se mantuvieron constantes durante la prueba con variaciones menores que no afectaron el análisis realizado. Los resultados experimentales indicaron que la conductividad térmica del suelo de estudio es $1.63 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y la resistencia térmica de estado estable de la pila de energía es $0.09 \text{ m }^\circ\text{C W}^{-1}$. Estos resultados obtenidos son similares a los reportados en la literatura internacional obtenidos en otras partes del mundo. Los parámetros medidos constituyen un dato muy valioso para el diseño de pilas de energía en México.

En el sitio del Estado de México, donde la prueba TRT se ejecutó directamente en el subsuelo, se obtuvieron seis muestras inalteradas de suelo arenoso para su estudio en el laboratorio. Este suelo se caracterizó con base en sus propiedades índice y la clasificación SUCS. Con base en las propiedades índice obtenidas en el laboratorio, la estratigrafía del sitio está conformada principalmente por arenas limosas con algunas intercalaciones de gravas, y se presentan contenidos de agua entre 13% y 25%, además, exhiben una densidad de sólidos baja. Como complemento, en las muestras analizadas se determinaron también sus propiedades térmicas en el laboratorio por medio del método transitorio de la aguja térmica (con ayuda del equipo *KD2 Pro*). Se utilizaron dos sensores, el sensor de aguja simple TR-1 y el sensor de aguja doble SH-1. El primer sensor mide la conductividad térmica, y el segundo mide la conductividad térmica, la difusividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica de las muestras de suelo. Los resultados de las pruebas de laboratorio indicaron que las muestras ensayadas al noreste del Estado de México se caracterizan por tener valores bajos de densidad y por lo tanto bajas conductividades térmicas. Particularmente, en las pruebas realizadas se determinó una conductividad

térmica media de $0.806 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ con la aguja simple y $0.763 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ con la aguja doble. La capacidad calorífica volumétrica del suelo fue de $1.824 \text{ MJ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, mientras que la difusividad térmica presentó un valor medio de $0.521 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, todos ellos, resultados medidos en el laboratorio. Se observó que la capacidad calorífica aumenta en los estratos de mayor profundidad, mientras que la difusividad térmica decrece con la profundidad debido a la baja densidad del material. Los resultados del ensayo TRT *in situ* ejecutado en el pozo de prueba se procesaron e interpretaron con el modelo analítico de fuente lineal infinita propuesto por Ingersoll y Plass (1948). La conductividad térmica estimada con este modelo de la fuente lineal resultó de $0.822 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. A pesar de que el pozo de prueba se rellenó con una mezcla especial a base de arena sílica, grafito amorfo y cemento para facilitar la transferencia de calor, no se obtuvo un valor de conductividad térmica alto, ya que el suelo del sitio de prueba no resultó ser buen conductor de calor. Se esperaba que el resultado de la conductividad térmica fuera más alto, como los valores que se han reportado en la literatura internacional. Lo anterior, pone de manifiesto la necesidad de conocer información adicional del suelo ensayado, como los datos mineralógicos del suelo donde se realizan este tipo de pruebas. En este sitio, se midió también la variación de la temperatura a diferentes profundidades, observándose que la evolución de la temperatura del suelo es diferente en toda la profundidad del pozo de observación debido a la variación de las propiedades térmicas del suelo. Una vez finalizada la prueba TRT, se monitoreo la temperatura ambiente y la temperatura del suelo (de abril a junio de 2021). Se identificó que las variaciones de la temperatura ambiente influyen en la temperatura del suelo, pues durante los meses de monitoreo se registraron fluctuaciones que se asumen se deben a los días calurosos típicos de la primavera y los días lluviosos y nublados que se presentan comúnmente en el verano.

Las temperaturas del pozo de prueba no se recuperaron completamente, la temperatura del suelo continuó disminuyendo, afectada principalmente por la temperatura ambiente (19.76°C). Después de 54 días de monitorear la temperatura del suelo se observó que a mayor profundidad se alcanzó el equilibrio térmico (20.35°C) debido al almacenamiento de calor durante los días de primavera.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta investigación representan de manera optimista la oportunidad del desarrollo futuro de las estructuras termoactivas en nuestro país. Además, aportan gran conocimiento de las propiedades térmicas de los suelos nacionales.

REFERENCIAS

Akrouch, G. A., Briaud, J. L., Sanchez, M., & Yilamz, R. (2016). Thermal cone test to determine soil thermal properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(3), 1-12.

Allan, M. L. y Kavanaugh, S.P. (1999). Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for Ground Source Heat Pumps. *HVAC & Research*, 5(2): 85-96.

Álvarez, G. G. (2013) Energía en Edificaciones. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Revista Mexicana de Física S 59(2):44-51.

Amis, A. y Loveridge, F.A. (2014). Energy piles and other thermal foundations for GSHP developments in UK practice and research. *REHVA Journal*, 2014(1): 32–35.

Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración – ATECYR (2012). Guía Técnica de Diseño de Sistemas de Intercambio Geotérmico de Circuito Cerrado.

ASTM International (2000) C 143 Standard test method for slump of hydraulic cement concrete, PA. ASTM International.

ASTM International (2009). D6910 Standard test method for Marsh Funnel Viscosity of clay construction slurries, PA. ASTM International.

ASTM International (2014b). D5334-14 Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. West Conshohocken, PA. ASTM International.

Austin, W. A. (1998). Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. Thesis of Master. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma.

Austin, W. A., Yavuzturk, C., Spitler, J.D. (2000). Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. *ASHRAE Transactions*. 106(1):365-379.

Bandeira Neto, L. A. (2015). Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado. Tesis de Maestría. Universidade de São Paulo.

Banks, D. (2012). From Fourier to Darcy, from Carslaw to Theis: the analogies between the subsurface behaviour of water and heat. *Italian Journal of Groundwater*, AS03013, 9–18.

Barba-Galdámez, D. F. (2018). Estudio del comportamiento de estructuras termoactivas con énfasis en pilas de energía Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Blázquez, C.S., Martín, A.F., Nieto, I.M., García, P.C., Sánchez Pérez, L.S. y González-Aguilera, D., (2017). Analysis and study of different grouting materials in vertical geothermal closed-loop systems. *Renewable Energy*, 114: 1189–1200

- Borinaga-Treviño, R., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D., Del Coz-Díaz, J. J. (2013). Study of different grouting materials used in vertical geothermal closed-loop heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 159–167.
- Bose, J.E. (1984). Closed-Loop Ground-coupled Heat Pump Design Manual. Stillwater, Oklahoma State University, Engineering Technology Extension.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56 (2), 81-122.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. (1959). Conduction of Heat in Soilds, Second ed., Oxford University Press, Great Britain.
- Conti, P. (2015). Sustainable design of ground-source heat pump systems: optimization of operative life performances. Tesi di Dottorato di Ricerca. Università di Pisa.
- C-162-ONNCCE-2000. Industria de la Construcción- Concreto hidráulico-Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico.
- Dalla, S. G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., Bertermann, D., Mendrinós, M., Pasquali, R., Perego, R., Pera, S., Di Sipio, E., Cassiani, G., De Carli. M., Bernardi, A. An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics* 85,101758.
- Derman, J.D., Kavanaugh, S.P. (1991). Simulation of vertical U-tube ground coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution. *ASHRAE*. 97(1):287-295.
- De Moel, M., Bach, P. M., Bouazza, A., Singh, R. M., y Sun, J. O. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9): 2683–2696.
- Delaleux, F., Py, X., Olives, R. y Dominguez, A. (2012). Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 33–34: 92–99.
- ECES (2013), Annex 21 Thermal Response Test. Final report.
- Eklöf C., Gehlin, S. (1996). TED- A mobile Equipment for Thermal Response Test. Master of Science Thesis. Luleå University of Technology, Sweden,
- Ericsson, L.O. (1985). Heat Exchange between Crystalline Bedrock and Borehole in an Energy Well System. Department of Geology, Chalmers University of Technology and University of Göteborg. A 52, Göteborg, Sweden.
- Esen, H.,e Inalli, M. (2009). In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazig Turkey. *Energy and Buildings*, 41(4), 395–401.
- Farouki, O. T. (1981). Thermal properties of soils. CRREL Monograph 81-1. Hanover, NH. United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.

- Florides, G., Kalogirou, S. (2005). Annual Ground Temperature Measurements at Various Depths. 8th REHVA World Congress Clima.
- Franco, A., Moffat, R., Toledo, M. & Herrera P. (2016). Numerical sensitivity analysis of thermal response tests (TRT) in energy piles. *Renewable Energy* 86, 985-992.
- Gehlin, S. (2002) Thermal Response Test. Method Development and Evaluation. Luleå University of Technology, Sweden. 191.
- Gehlin, S., Hellström, G. (2003). Comparison of Four Models for Thermal Response Test Evaluation. *ASHRAE Transactions*, 109(1)
- Gehlin, S., Nordell B., (2003). Determining Undistributed Ground Temperature for Thermal Response Test. *ASHRAE Transactions*, 109(1), 151-156.
- González, J.L., Ibarra-Razo, E., Rangel-Núñez, Ovando, E. (2012). Empleo del ficómetro en los suelos duros y aluviales del valle de México. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Cancún, Quintana Roo.
- Ground Source Heat Pump Association (2011) Closed-loop Vertical Borehole Design, Installation & Materials Standards. Milton Keynes, United Kingdom, 2011.
- Guo, Y., Zhang, G., Liu, S., (2018) Investigation on the thermal response of full-scale PHC energy pile and ground temperature in multi-layer strata. *Applied Thermal Engineering*, 143, 836-848.
- Hosokawa, M. K. J., (2019). Comportamiento termomecánico de las estructuras termoactivas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Ingersoll, L.R., Plass, H.J. (1948). Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump. *ASHVE Transactions*, 54, 339-348.
- ISO-17628. (2015). Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos geotérmicos: Determinación de la conductividad térmica de suelos y rocas utilizando una sonda geotérmica instalada en un sondeo. Madrid, España, 2015.
- Jensen-Page, L., Loveridge, F., Narsilio, G. A. (2019). Thermal response testing of large diameter energy piles. *Energies*, 12(14), 1–25.
- Kamarad, A., (2017). Design and construction of a mobile equipment for thermal response test in borehole heat exchangers. Master of Science Thesis. KTH School of Industrial Engineering and Management. SE-100 44 Stockholm.
- Kavanaugh, S. y Rafferty, K. (2014). Geothermal Heating and Cooling. Design of Ground-Source Heat Pump Systems. Atlanta: ASHRAE.
- Kim, D., Kim, G. y Baek, H. (2015). Relationship between thermal conductivity and soil-water characteristics curve of pure bentonite-based grout. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 84: 1049-1055.

Kim, D. y Seokhoon, O. (2018). Optimizing the design of a vertical Ground Heat Exchanger: measurement of the thermal properties of bentonite-based grout and numerical analysis. *Sustainability*, 10 (8): 2664.

Lee, C., Lee, K., Choi, H., y Choi, H.P. (2010). Characteristics of Thermally-Enhanced Bentonite Grouts for Geothermal Heat Exchanger in South Korea. *Science China Technological Sciences*, 53(1): 123-128.

López-Acosta N.P. y Barba-Galdámez, D.F. (2018). Pilas o Pilotes de Energía: Cimentaciones termoactivas para el aprovechamiento de recursos geotérmicos. *Geotecnia* 247:36-39. México: SMIG.

López-Acosta, N. P., Rivera-Martínez, A. M. y Barba-Galdámez, D. F. (2022). "First Thermal Response Test (TRT) for energy geo-structure applications in Mexico", *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sidney, Australia.

López-Acosta, N. P., Rivera-Martínez, A. M. y Barba-Galdámez, D. F. (2022). "Construcción y ensayo TRT en la primera pila de energía en México", *Proceedings of the 5th International Conference on Deep Foundations, March 3-4, 2022. Mexico City, Mexico*.

Loveridge, F., & Powrie, W. (2013). Temperature response functions (G-functions) for single pile heat exchangers. *Energy*, 57, 554–564.

Loveridge, F., Low, J., & Powrie, W. (2017). Site investigation for energy geostructures. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 50(2), 158–168.

Loveridge, F., McCartney, J.S., Narsilio, G. A., & Sanchez, M. (2020). Energy geostructures: A review of analysis approaches, in situ testing and model scale experiments. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 22.

Martínez D. (2012). Estudio del movimiento sísmico de Naucalpan, Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, FES Acatlán, UNAM.

Oravec, J., Šikula, O., Nováková, I. (2020). An Evaluation of the Mathematical Models of Energy Piles. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 28(1), 44–48.

Pérez-Molina, C., Gomez, M. J. A., Gil, R., Orueta, G. D., Sancristobal, E., Martin, S., Tawfik, M., Castro, M., Pesquera, A., Loro, F. G. (2013). Performance-centered adaptive curriculum for employment needs. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 1–21.

Portillo-Arreguín, D. M., López-Acosta, N. P., Barba-Galdámez, D.F. y Sánchez, M. (2018). Determinación de propiedades térmicas de los suelos a partir del método de la aguja". XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, León, Guanajuato: 53-60.

Portillo-Arreguín, D. M., López-Acosta N.P., Barba-Galdámez, D.F. y Singh, R. M. (2019). Thermal properties of Mexico Basin soils. En: López-Acosta et al. (Eds.) *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*. Amsterdam: IOS Press.

- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L. y Lefebvre, R., (2011). A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. *Ground Water*, 49: 932–945.
- Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., & Davies, M. (2000). Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp-213-265.
- Remund, C.P. y Lund, J. T. (1993) Thermal enhancement of bentonite grouts for vertical ground source heat pump systems. *AES*, 29: 95-106.
- Rojas, A., Zuñiga O., Sánchez M., Pérez J., Gascó J.M. (2007). Conductividad térmica del suelo, materia orgánica, actividad y biomasa microbianas en sistemas de cultivo de maracuyá en Toro, Valle del Cauca. *Acta Agron. (Palmira)*. 56 (1), 17-22.
- Sanner, B., (1986). Research on ground coupled systems with vertical heat exchangers. *Proceedings of the Ground sources heat pump Workshop*. Albany NY, 113-117.
- Sanner, B. (2003) Thermally enhanced grout and the reduction of borehole thermal resistance. *9th International Conference on Thermal Energy Storage*, Warsaw, Polonia: 705-708.
- Santana H. (2011). Agrietamiento en la zona de Naucalpan, Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, FES Acatlán, UNAM.
- Sauer, M., Sanner, B., Mands, E., Grundmann, E., Fernandez, A. (2012). Thermal Response Test: Practical experience and extended range of application. *InnoStock. The 12th International Conference on Energy Storage*.
- Smith, M., Perry, R. (1999). In situ testing and thermal conductivity testing. *Proceedings of The 1999 GeoExchange Technical Conference & Expo*, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma. 16-19.
- Spitler, J.D., Rees, S.J., Yavuzturk, C. (1999). More Comments on *In situ* Borehole Thermal Conductivity Testing. *The Source*, March/ April 12(2): 4-6.
- Spitler, J.D., Yavuzturk, C., Rees, S.J (2000). In situ Measurement of Ground Thermal Properties. *Proceedings of Terrastock 2000*. Stuttgart, August 28-September 1, 165-170.
- Suryatriyastuti, M. E., Mroueh, H., & Burlon, S. (2012). Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3344-3354.
- Torres, L. V., García M. P., Hernández, O. A., Rivas, C. F., González, R. I., Martínez, E. J., García, A., Mercado, H. A., Lara, C.F., Ling, L. J. (2016). Proyecto 13 del CeMIE-Geo: Bombas de Calor Geotérmico para acondicionamiento de espacios habitacionales y comerciales. Primeros resultados. *Memorias del XXIII Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana*, Morelia, Mich.
- Vieira, A., Alberdi-Pagola, M., Christodoulides, P., Javed, S., Loveridge, F., Nguyen, F., Cecinato, F., Maranha, J., ..., Radioti, G. (2017). Characterization of ground thermal and Thermo-mechanical behavior for shallow geothermal energy applications. *Energies*, 10(12), 2044.

Villanueva, P. A., Gutiérrez, F.R., (2019). Nueva sede de Ingeniería IDOM-ACXT en Madrid. Ingeniería IDOM-ACXT.

Witte, H.J.L. (2016). In situ estimation of ground thermal properties. En: S.J. Rees (Ed.) Advances in Ground-Source Heat Pump Systems. Cambridge: Woodhead Publishing.

ANEXOS

ANEXO A. Reporte fotográfico de la construcción y puesta en marcha del equipo de respuesta térmica (TRT-IIUNAM)

A.1. Construcción del equipo de respuesta térmica (TRT-IIUNAM)

La construcción del equipo de respuesta térmica TRT-IIUNAM se llevó a cabo en cuatro etapas que abarcan desde la definición de los componentes y características principales del circuito interno de funcionamiento, la instalación de los dispositivos hidráulicos y electrónicos, la configuración del sistema de adquisición de datos y el recubrimiento del equipo móvil.

Etapa 1 Construcción de remolque y colocación de equipo hidráulico



(a) Suministro de los materiales que componen el circuito interno de funcionamiento



(b) Montaje en el remolque del equipo TRT-IIUNAM

Etapa 2 Suministro e instalación de medidores eléctricos y sensores



(a) Sensor Pt 100 clase A



(b) Colocación manómetros de presión y sensores Pt 100

Etapa 3 Suministro del lector digital



(a) Configuración del sistema de adquisición de datos

Etapa 4 Colocación de puertas y aislante térmico



a) Vista frontal del equipo TRT-IIUNAM



(b) Vista lateral trasera del equipo TRT-IIUNAM

A.2. Puesta en marcha del equipo de respuesta térmica (TRT-IIUNAM)

La puesta en marcha del equipo de respuesta térmica consistió en adaptar todos los componentes eléctricos para su funcionamiento independiente dentro del equipo TRT-IIUNAM con ayuda de una caja de control eléctrico, también se verificó la calibración de los sensores de temperatura Pt 100 y se realizaron las modificaciones necesarias al calentador eléctrico para adaptar la resistencia eléctrica y que brindara la potencia deseada de trabajo. Por último, se comprobó el funcionamiento del equipo TRT-IIUNAM en diferentes condiciones de trabajo antes de ser llevado a campo. Se comprobó que el flujo de calor inyectado y el flujo hidráulico fueran constantes.



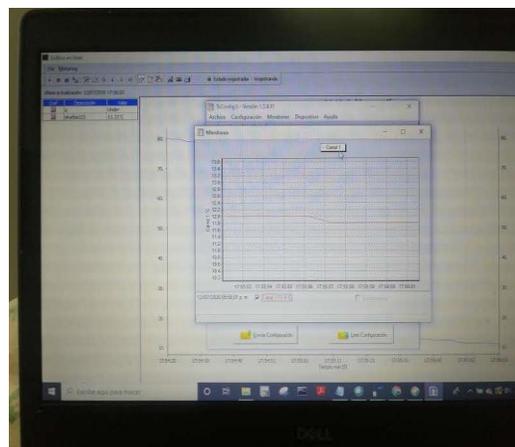
(a) Montaje del circuito interno de funcionamiento



(b) Conexión de los manómetros de prueba para medir la presión



(c) Transductor de temperatura



(d) Interfaz de calibración de los sensores Pt 100



(e) Medición del sensor Pt 100 en agua fría

Metered values		Description	Value
MANOMETROB	B	MANOMETROA	Under
MANOMETROB	B	MANOMETROB	Under
PT 100A	C	PT 100A	29.9 °C
PT 100B	D	PT 100B	29.8 °C

(f) Conexión de los sensores Pt 100 al sistema de adquisición de datos



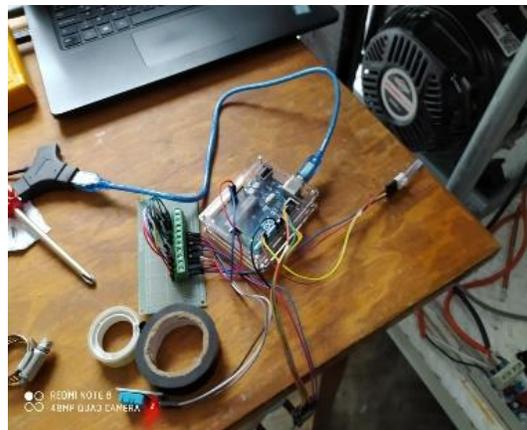
(g) Interior del calentador eléctrico



(h) Resistencias eléctricas de prueba para lograr la potencia de trabajo deseada



(i) Analizador de factores eléctricos



(j) Placa Arduino UNO para el calentado eléctrico



(k) Primer puesta en marcha del equipo TRT-IIUNAM



(l) Ensayo de prueba con la manguera extendida



(m) Prueba de funcionamiento del equipo TRT-IIUNAM completo



(n) Ensayo con manguera en cisterna

ANEXO B. Estudio de diferentes mezclas para uso como relleno en ensayos de respuesta térmica (TRT)

Se presentan los resultados de diferentes mezclas de bentonita, cemento, arena sílica y grafito amorfo propuestas como relleno de perforación para la ejecución del ensayo de respuesta térmica (*Thermal Response Test, TRT*). Se determinaron en laboratorio la viscosidad, trabajabilidad (a partir de la prueba de revenimiento) y conductividad térmica de veintiocho mezclas de interés. Al final, se sugiere una mezcla para su empleo en los ensayos de respuesta térmica (TRT) en el municipio de Naucalpan de Juárez en el Estado de México. La Tabla B.1 muestra las proporciones utilizadas en cada mezcla analizada. La selección de los materiales y sus proporciones se basó en recomendaciones dadas en la literatura internacional para rellenos de pozos intercambiadores de calor (Lee *et al.* 2010, Kim y Seokhoon 2018).

Tabla B.1. Dosificación en peso de las mezclas estudiadas

Mezcla	Bentonita (%)	Cemento (%)	Arena sílica (%)	Grafito amorfo (%)	Agua (%)
Bentonita con arena sílica					
B20-A0	20	—	0	—	80
B20-A10	20	—	10	—	70
B20-A20	20	—	20	—	60
B20-A30	20	—	30	—	50
B30-A0	30	—	0	—	70
B30-A10	30	—	10	—	60
B30-A20	30	—	20	—	50
B30-A30	30	—	30	—	40
Bentonita con grafito amorfo					
B20-G0	20	—	—	0	80
B20-G5	20	—	—	5	75
B20-G10	20	—	—	10	70
B20-G20	20	—	—	20	60
B30-G0	30	—	—	0	70
B30-G5	30	—	—	5	65
B30-G10	30	—	—	10	60
B30-G20	30	—	—	20	50
Bentonita con arena sílica y grafito amorfo					
BA0-G5	20	—	0	5	75
BA10-G5	20	—	10	5	65
BA20-G5	20	—	20	5	55
BA30-G5	20	—	30	5	45
BA0-G10	30	—	0	10	70
BA10-G10	30	—	10	10	60
BA20-G10	30	—	20	10	50
BA30-G10	30	—	30	10	40
Cemento con bentonita, arena sílica y grafito amorfo					
CM1	0	40	15	5	40
CM2	5	40	15	5	35
CM3	10	40	15	5	30
CM4	20	40	15	5	20

Caracterización de muestras en el laboratorio

(a) Medición de la trabajabilidad (fluidez)

La fluidez de las mezclas se midió usando el Cono de Abrams, de acuerdo con la norma ASTM C142/C143M00 (Figura B.1). La prueba consiste en llenar tres capas de un cono truncado de 30 cm de altura, picando cada capa con 25 golpes mediante una varilla. Al final de la tercera capa se enrasa el cono y se levanta verticalmente midiendo la diferencia de altura entre el cono y la mezcla derramada. La diferencia en centímetros se denomina revenimiento de la mezcla.



(a)



(b)

Figura B.1. (a) Cono de Abrams, (b) Prueba de revenimiento en la mezcla CM3.

(b) Medición de la densidad

La densidad de las mezclas evaluadas se determinó mediante una balanza de lodos (Figura B.2.), que consiste en un recipiente cilíndrico para contener la mezcla en un brazo y un contrapeso deslizante con una escala en el otro.



Figura B.2. Balanza de lodos.

(c) Medición de la conductividad térmica

La conductividad térmica de las mezclas se midió usando el equipo *KD2 Pro*, se utilizó el sensor TR-1 (aguja simple) Para la determinación de las mezclas se elaboraron especímenes cilíndricos de 20 cm de alto por 7.5 cm de diámetro (Figura B.3). Para cada una de las mezclas se hicieron dos especímenes independientes. La conductividad térmica

de las mezclas de bentonita se midió diario durante un periodo de 15 días, mientras que las mezclas de concreto se ensayaron luego de 28 días de curado. Para la determinación diaria de la conductividad térmica de cada espécimen se realizaron mediciones triplicadas separadas por un intervalo de 15 minutos.

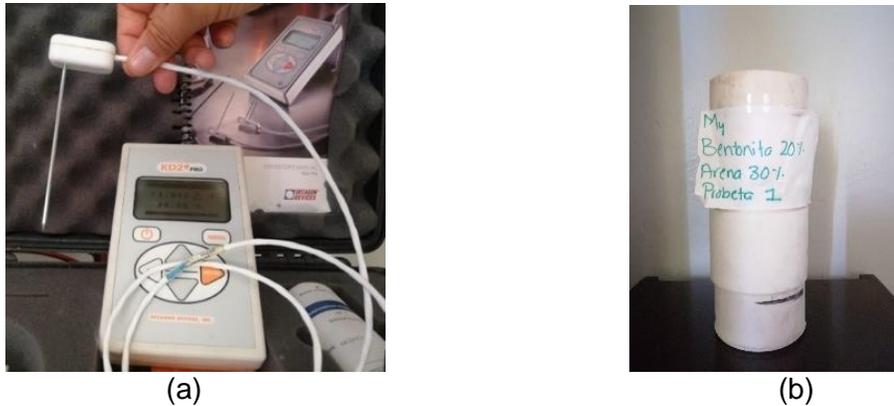
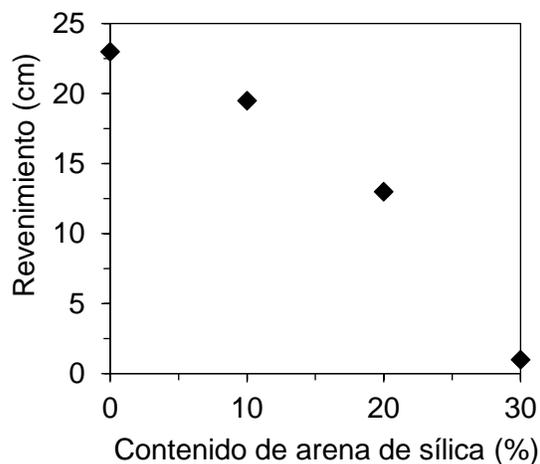


Figura B.3. (a) Sensor de aguja simple TR-1 del equipo KD2 Pro, (b) Espécimen de la mezcla B20-A30 analizada (20% bentonita y 30% arena).

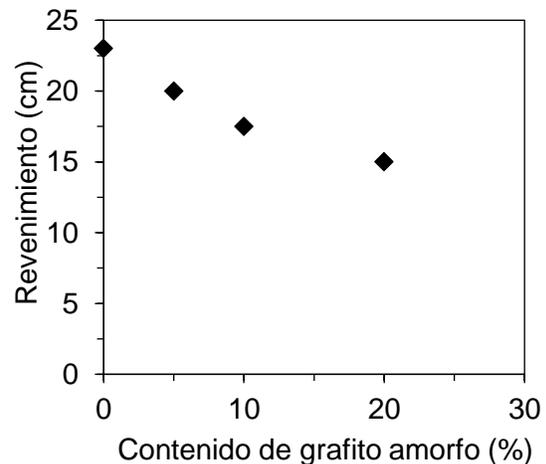
Resultados experimentales

(a) Trabajabilidad (*fluidez*)

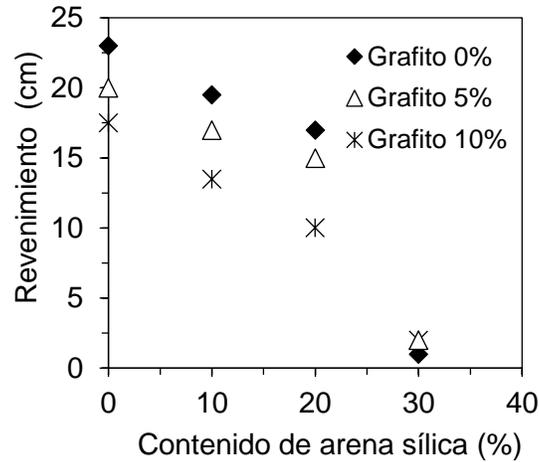
La trabajabilidad o fluidez obtenida en las mezclas de bentonita (20%) y los dos materiales agregados (arena sílica y grafito amorfo) se presenta en la Figura B.4. Cabe señalar que no fue posible medir el revenimiento de las mezclas con un 30% de bentonita debido a que la viscosidad de las mezclas aumento considerablemente. En general, el revenimiento de las mezclas analizadas varía de 23 cm (las más fluidas) a 1 cm (las menos fluidas). Se observó que el incremento en el contenido de los materiales agregados (arena sílica o grafito amorfo) disminuye significativamente la trabajabilidad o fluidez de las mezclas (Figs. B.4a y B.4b). Dicho efecto es más pronunciado con la adición de arena sílica que con el grafito amorfo. Esto es, un contenido de 30% de arena sílica reduce por completo la trabajabilidad de la mezcla (Fig. B.4a). De igual forma, se observó un comportamiento similar en las mezclas de bentonita con arena sílica y grafito amorfo (Fig. B.4c).



(a) Bentonita (20%) y arena sílica



(b) Bentonita (20%) y grafito amorfo



(c) Bentonita (20%), arena sílica y grafito amorfo

Figura B.4. Variación de la fluidez de las mezclas analizadas de bentonita (20%) con otros materiales.

En las mezclas de cemento, bentonita, arena sílica y grafito se fijó la cantidad de los materiales agregados (15% arena sílica y 5% grafito amorfo) y se varió la proporción de bentonita y cemento (Figura B. 5). Se observó que a medida que el contenido de bentonita aumenta también se incrementa la viscosidad de las mezclas y se reduce su trabajabilidad. En general, las mezclas de cemento evaluadas (CM1, CM2, CM3 y CM4, Tabla C.1) mostraron mejor trabajabilidad que las mezclas a base únicamente de bentonita y otros materiales, con un rango de revenimiento entre 23 cm y 15 cm. A partir de las mezclas analizadas, únicamente las mezclas B20-A0, B20-A10, B20-G0, B20-G5, CM1 y CM2 cumplieron los criterios de trabajabilidad establecidos para su consideración como rellenos de perforación para la prueba TRT, esto es, exhibieron un revenimiento superior a 18 cm.

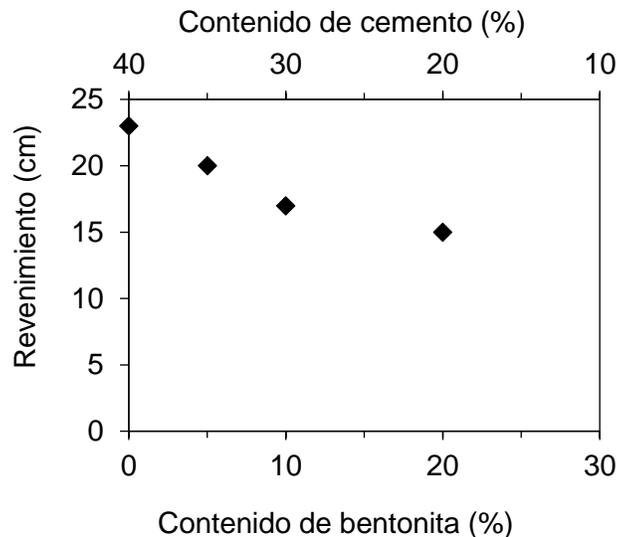


Figura B.5. Variación de la fluidez de las mezclas de bentonita, cemento, arena sílica (15%) y grafito amorfo (5%).

(b) Densidad

La densidad de las mezclas de bentonita varió entre 1.14 y 1.65 g/cm³ (Figura B. 6). En general, este parámetro aumenta con el incremento en el contenido de bentonita, arena sílica y/o grafito amorfo. Este efecto es más significativo con la arena sílica debido a que su peso específico es mayor que el de los demás agregados (Figs. B.6a y B.6b). Las mezclas de bentonita con arena sílica y grafito amorfo muestran un comportamiento similar, es decir, un incremento de la densidad a mayor contenido de agregado (Fig.B. 6c).

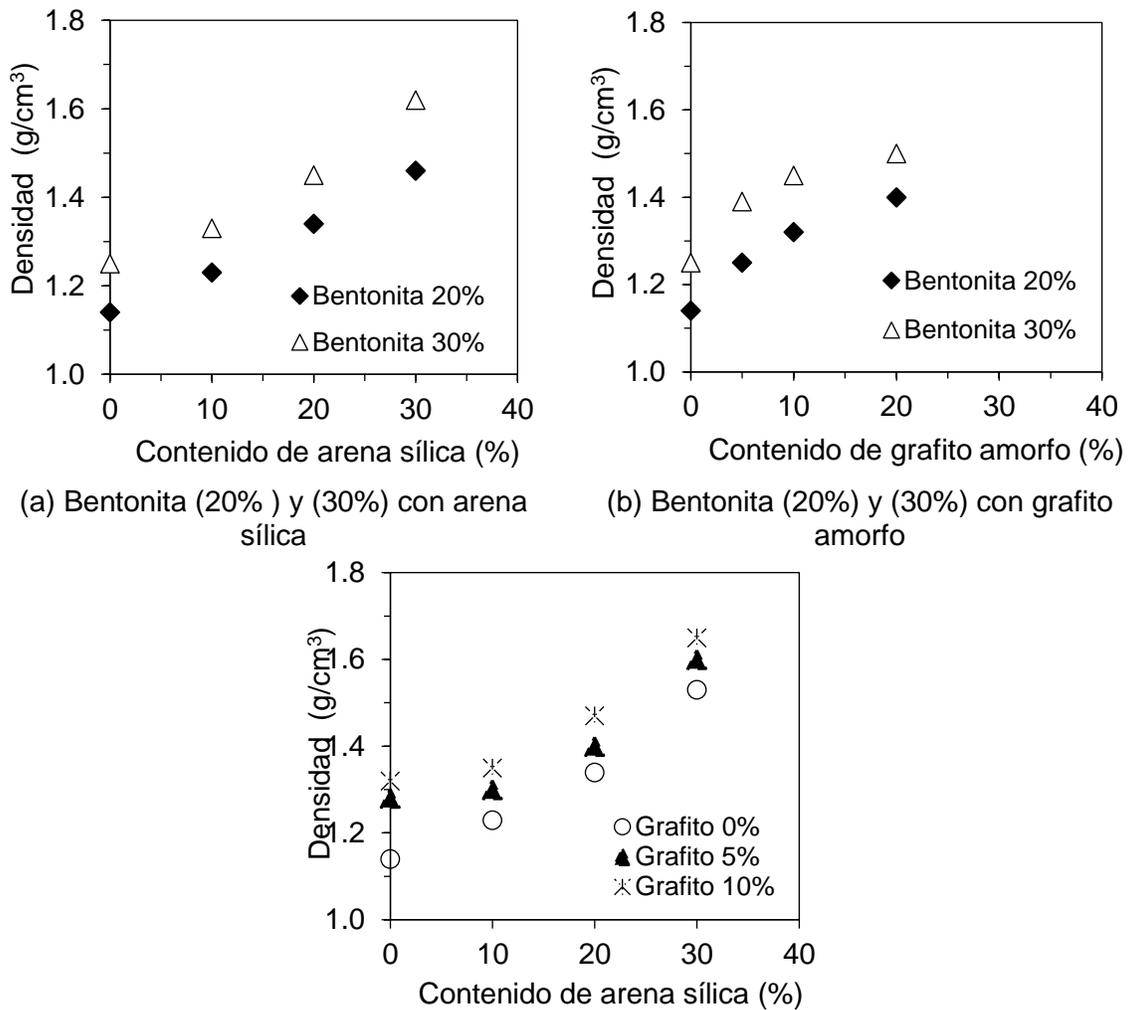


Figura B. 6. Variación de la densidad de las mezclas analizadas de bentonita (20%) con otros materiales.

En la Figura B. 7 se presenta la densidad de las mezclas con cemento, bentonita, arena sílica y grafito amorfo. Se observa que la adición de cemento genera un incremento significativo en la densidad de las mezclas, con valores entre 1.85 y 2.0 g/cm³. Pese a que las densidades de las mezclas estudiadas son superiores a los valores de las lechadas bentoníticas usadas en construcción (1.0 g/m³), éstas siguen siendo menores a la densidad del concreto (2.2 a 2.4 g/cm³), por lo que no se considera que exista algún problema para su utilización en campo.

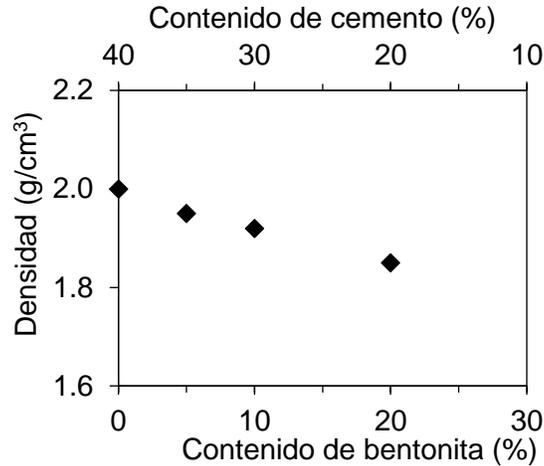
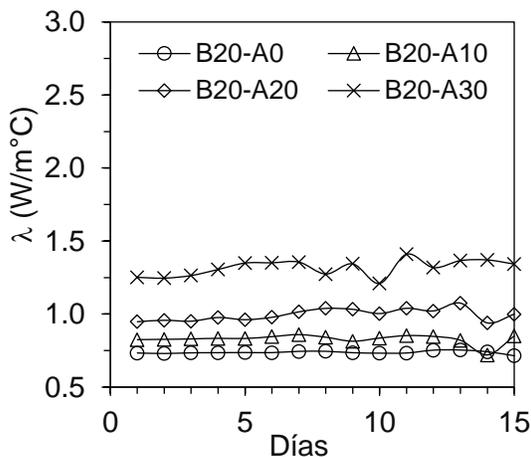


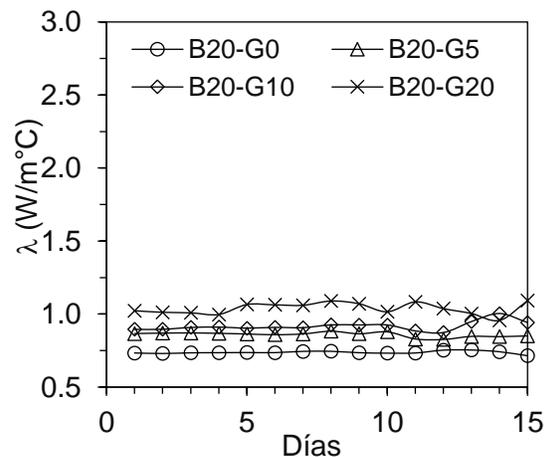
Figura B. 7. Variación de la densidad de las mezclas analizadas de bentonita, cemento, arena sílica (15%) y grafito amorfo (5%).

(c) Conductividad térmica

La conductividad térmica se determinó como el promedio de las mediciones en los especímenes de prueba. La Figura B.8 muestra la variación de la conductividad térmica de las mezclas de bentonita estudiadas a lo largo de los 15 días de prueba. En general, las mezclas de bentonita y grafito amorfo mostraron mayor conductividad, aunque experimentaron mayor oscilación a lo largo del tiempo (Figura B. 8d). La conductividad térmica de las mezclas con 20% de bentonita y un agregado (arena sílica o grafito amorfo) mostraron un comportamiento estable durante los 15 días de medición (Figuras B. 8a, B. 8b, B. 8c). La mezcla B30-G20 presentó un aumento considerable de la conductividad térmica y a partir del día 10 la medición de la conductividad térmica es inestable (Figura B. 8d). El aumento significativo de la conductividad térmica se observó en las mezclas de bentonita, arena sílica y grafito amorfo como se muestra en las Figuras B. 8e y B. 8f. Particularmente la mezcla BA30-G10 presentó un aumento súbito de la conductividad térmica hasta $2 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ durante un periodo de 4 días (Figura B. 8f).



(a) Bentonita (20%) y arena sílica



(b) Bentonita (20%) y grafito amorfo

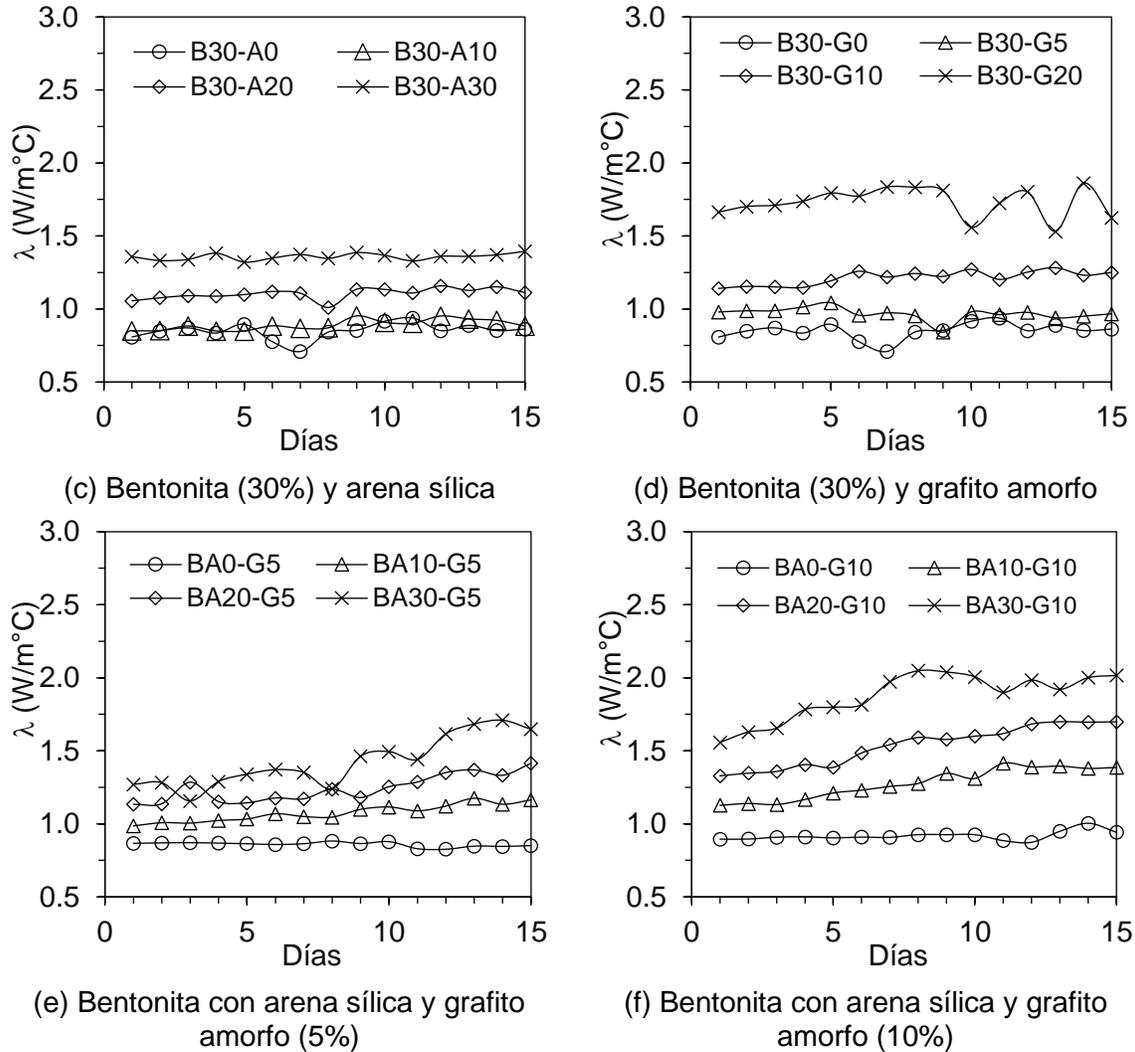


Figura B.8. Variación de la conductividad térmica λ de las mezclas analizadas.

La Figura B.9 compara la conductividad térmica promedio de las mezclas de bentonita con porcentajes de 20% y 30% y arena sílica (Figura B. 9a), las mezclas de bentonita con porcentajes de 20% y 30% y grafito amorfo (Figura B. 9b) y las mezclas de bentonita (20%) con arena sílica y grafito amorfo (Figura B. 9c). La conductividad térmica de las mezclas de bentonita y arena sílica varió entre $0.70-1.30 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ y $0.85-1.35 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ para contenidos de 20% y 30% de bentonita, respectivamente. Por otra parte, la conductividad térmica de las mezclas de bentonita y grafito amorfo varió entre $0.70-1.105 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ y $0.8-1.7 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ para contenidos de bentonita de 20% y 30%. En general, el manejo de las mezclas con un 30% de bentonita fue complicado debido a su baja trabajabilidad. Los resultados indican que incrementos en el contenido de los diferentes agregados (arena sílica o grafito amorfo) producen aumentos significativos en la conductividad térmica de las mezclas, siendo estos cambios más pronunciados con la incorporación de grafito amorfo. Se observó un comportamiento similar en las mezclas de bentonita con arena sílica y grafito (Figura B.9c).

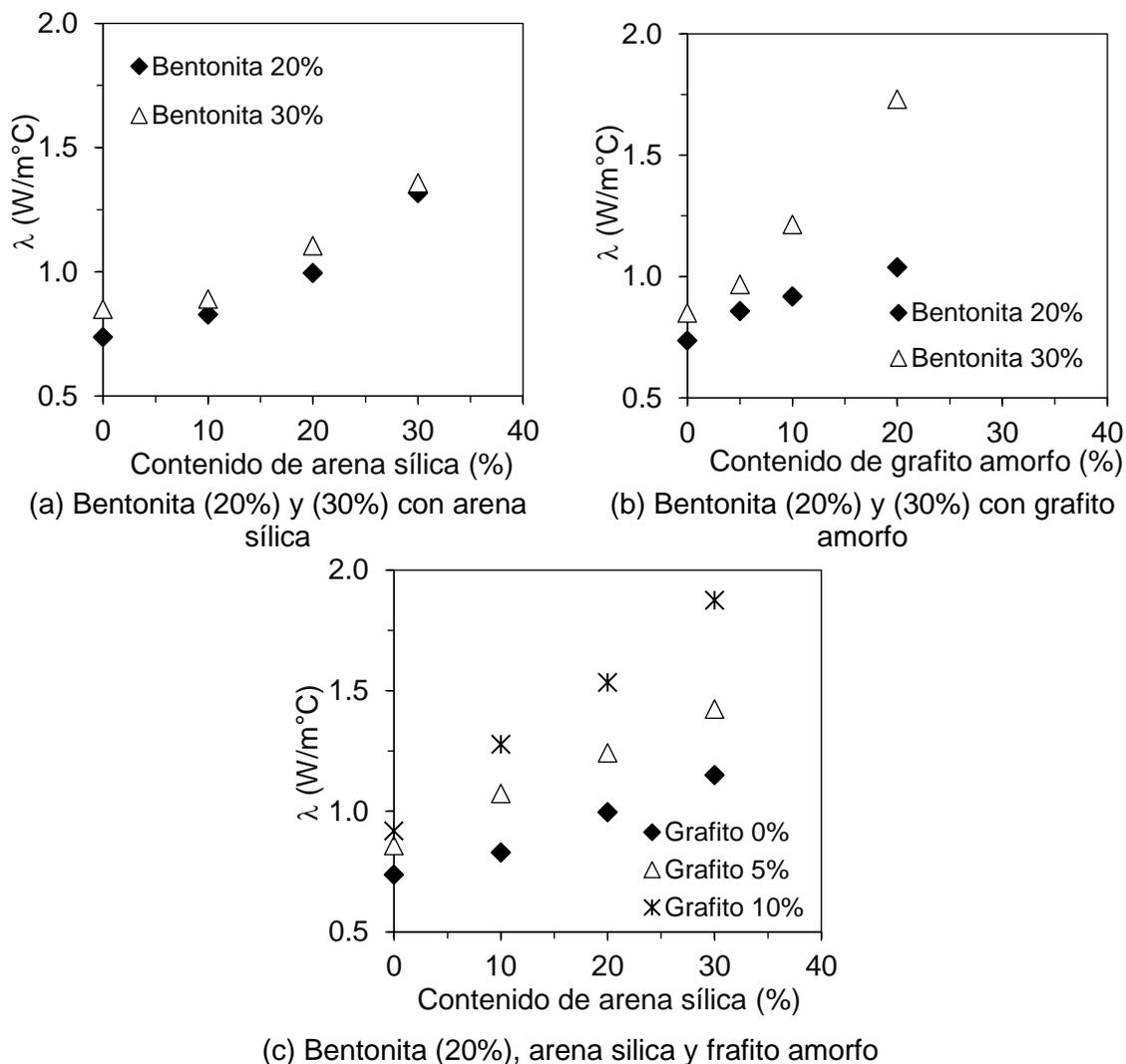


Figura B.9. Variación de la conductividad térmica λ de las mezclas analizadas.

Por último, los resultados de las mezclas de cemento se presentan en la Figura B. 10. Estas mezclas muestran características más adecuadas para su implementación como relleno en el ensayo TRT, ya que exhiben mayores conductividades térmicas con mayor fluidez y menor densidad. En particular, las mezclas CM1 y CM2 presentan conductividades térmicas superiores a $1.1 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ con un revenimiento mayor a 18 cm.

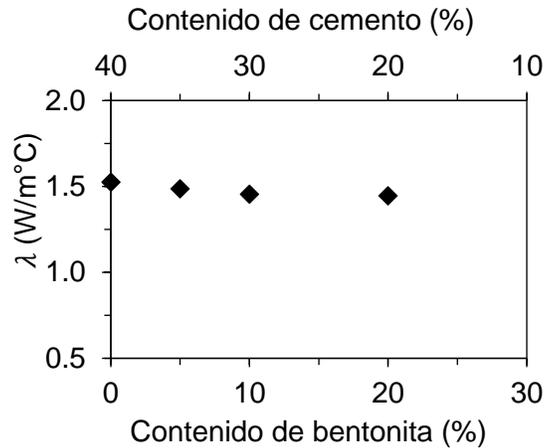


Figura B.10. Variación de la conductividad térmica de las mezclas de bentonita, cemento, arena sílica (15%) y grafito amorfo (5%).

Comentarios concluyentes

- Las mezclas constituidas por bentonita y arena sílica poseen una conductividad térmica entre 0.83 y 1.35 $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, pero son espesas y difíciles de manejar con revenimientos entre 19.5 y 0 cm.
- Las mezclas de bentonita y grafito amorfo presentan conductividades térmicas entre 0.85 y 1.73 $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Sin embargo, la inclusión de grafito amorfo aumenta la viscosidad de las mezclas, reduciendo su trabajabilidad.
- Las mezclas de bentonita, arena sílica y grafito amorfo presentaron valores de conductividad térmica entre 0.83 y 1.85 $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, pero no son trabajables pues la consistencia de las mezclas tiende a ser viscosa.
- Las mezclas que contienen cemento poseen conductividades térmicas mayores que 1.5 $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ con revenimientos entre 15 y 23 cm. En particular las mezclas CM1 y CM2 se consideran ideales para utilizarlas como relleno del ensayo de respuesta térmica (TRT), pues tienen un revenimiento mayor a 18 cm.

A pesar de que las mezclas de cemento con arena sílica y grafito exhiben un comportamiento apropiado para la realización de ensayos de respuesta térmica TRT, se recomienda la inclusión de un material plastificante para mejorar el revenimiento.