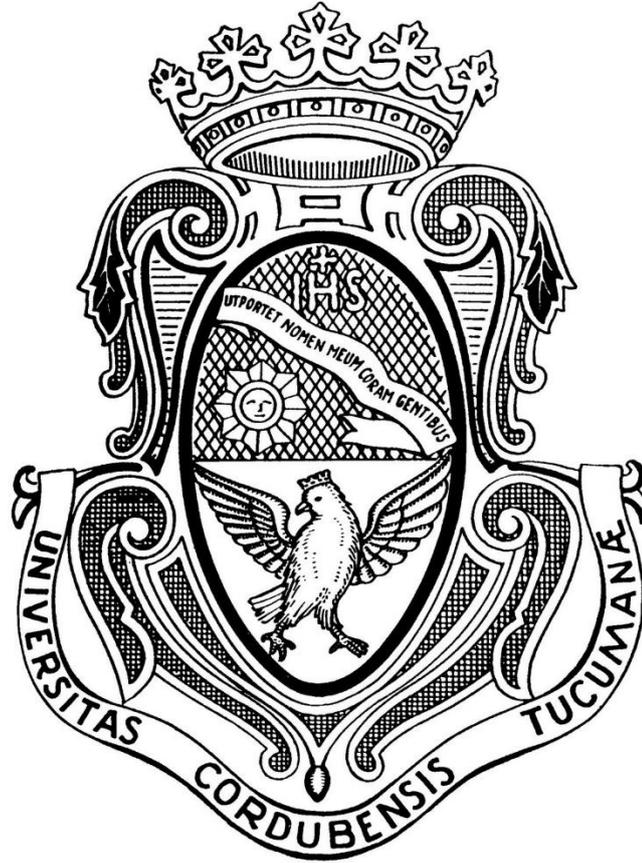


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

*FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y
NATURALES INGENIERÍA CIVIL*



PRÁCTICA SUPERVISADA

***GEOTERMIA DE BAJA ENTALPIA EN SUELOS
LOESSICOS: CASO DE ESTUDIO***

Peiretti, Agustina Sol

Tutor: Dra. Ing. Magalí E. Carro Pérez

Supervisor externo: Dr. Ing. Franco M. Francisca

Lugar: Centro de vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos.

Mayo 2017

RESUMEN

El presente trabajo forma parte de una práctica supervisada de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales (FCEFYN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC). El trabajo se llevó a cabo en el Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos de la FCEFYN de la UNC.

El objetivo de este trabajo es poner de manifiesto que es posible la utilización de la energía geotérmica de baja entalpía como una opción económica y ecológicamente amigable para la climatización de ambientes.

El informe se compone de una base bibliográfica recopilada de energía geotérmica, haciendo hincapié en la de baja entalpía y por el otro lado el análisis de distintos métodos para su aprovechamiento.

Se realiza un análisis de las diferentes configuraciones y métodos de cálculo disponibles en la bibliografía y se opta por uno de ellos, el que se considera más apropiado al caso de estudio.

El edificio estudiado es el edificio de ADIUC, que se encuentra en la ciudad Universitaria de Córdoba, el cual tiene un salón principal de grandes dimensiones donde se plantea colocar el sistema.

Para poder llevar a cabo los cálculos, es necesario conocer características térmicas de los parámetros intervinientes, tanto del suelo local, de los materiales de la envolvente de la construcción y del clima local. Una vez obtenidos los resultados, se realiza el análisis energético y económico que produce la aplicación del sistema y se obtienen una serie de resultados, que permiten conocer como es el comportamiento en suelos de diferentes características.

El análisis energético se determinó mediante balances térmicos realizados sobre un modelo de cálculo del caso de estudio. Para el cálculo de las cargas térmicas se utilizó un software libre BT6 creado por Dilasoft.

Para el análisis económico, se realiza una comparación de cuál sería el costo mensual de climatizar el ambiente sin la aplicación del sistema y cuánto con el mismo.

Los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que la implementación de este tipo de sistemas presenta una solución económica y enérgicamente eficiente para cualquier tipo de edificación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Córdoba y en particular a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, por la posibilidad de convertirme en profesional y por la calidad de cada uno de los educadores que forman parte de ella.

A mi mamá y familia, por estar siempre y acompañarme en este camino.

A mi novio, quien estuvo presente brindándome su apoyo y cariño para lograr mis metas.

A mis amigas de la vida por estar.

A los amigos que me dio la facultad.

A Norbert.

A la Dra. Ing. Magalí E. Carro Pérez, por guiarme en esta última etapa, por guiarme, por sus consejos y paciencia a lo largo de la realización del mismo.

Por último al Dr. Ing. Franco M. Francisca, por su aporte y dedicación.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA	8
1.1. Ámbito de desarrollo.....	8
1.2. Objetivos	8
1.3. Actividades desarrolladas.....	9
1.4. Aplicación de conocimientos de la carrera de Ingeniería Civil	9
1.5. Organización del informe.....	9
CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN.....	11
2.1. Crisis energética en el mundo	11
2.2. Situación en la Argentina.....	12
2.3. Matriz energética de Argentina.....	13
CAPÍTULO 3:ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	16
3.1. Introducción.....	16
3.2. Aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía	16
3.3 Dimensionado y forma de cálculo.....	23
CAPÍTULO 4:CASO DE ESTUDIO	28
4.1. Edificio a estudiar	28
4.2. Características técnicas del edificio.....	30
4.3. Temperaturas a considerar (para estimar en el subsuelo) ..	31
4.4. Características del suelo	32
4.5. Balance térmico.....	33
4.5.1.Materiales y métodos.....	37
4.5.2.Determinación del K de los materiales.....	42
4.5.3.Resultados del balance.....	46
CAPÍTULO 5:APLICACIÓN DE GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA AL CASO DE ESTUDIO.....	49
5.1. Cálculo	49

5.2. Diseño e implementación en el edificio.....	57
5.3. Evaluación del ahorro energético para el edificio.....	62
5.4. Análisis de variabilidad o confiabilidad.....	63
CAPÍTULO 6:CONCLUSIONES.....	65
CAPÍTULO 7:REFERENCIAS.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Perfil del suelo, Francisca 2011	32
Tabla 2: Valores máximos admisibles de K para condición de invierno en muros (Norma IRAM 11605).....	41
Tabla 3: Valores máximos admisibles de K para condición de verano en muros (Norma IRAM 11605).....	41
Tabla 4: Cálculo de resistencia térmica de Muro Interior	44
Tabla 5 : Cálculo de Resistencia térmica Muro Exterior.	45
Tabla 6: Cálculo de Resistencia térmica Cubierta Superior.	45
Tabla 7: Resumen de transmitancia.	46
Tabla 8: Transmitancia térmica máxima para los distintos niveles de confort higrométrico considerados (verano-invierno).	47
Tabla 9: Datos del balance utilizados en el programa BT6	47
Tabla 10: Propiedades térmicas utilizados en programa BT6	47
Tabla 11: parámetros utilizados en el programa BT6.	47
Tabla 12: Resultados de Balance térmico del lugar de estudio.	47
Tabla 13: Parámetros a considerar.....	49
Tabla 14: Temperaturas de diseño. (IRAM, 1996)	49
Tabla 15: Resultado de la aplicación del método de cálculo de diseño para las condiciones de verano.	50
Tabla 16: Resultado de la aplicación del método de cálculo de diseño para las condiciones de invierno.	50
Tabla 17: Resultado de la aplicación del método considerando como varía la Eficiencia.....	51
Tabla 18: Resultados de la aplicación del método con temperatura de ingreso constante en condiciones de verano.	52
Tabla 19: Resultados de la aplicación del método considerando temperatura de ingreso constante en condiciones de invierno.	52
Tabla 20: Transmitancia térmica máxima para los distintos niveles de confort higrométrico considerados (verano-invierno).....	55
Tabla 21: Comparación de resultados.....	56
Tabla 22: Comparación de resultados de balance térmico.....	62

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1: Matriz Energética de Argentina correspondiente al año 2015 (Secretaría de Energía de La Nación).....	13
Figura 2: Datos referidos al gradiente térmico (Ingesolum, 2008).....	17
Figura 3: Transporte de energía por conducción. (Ley de Fourier).....	18
Figura 4: Distribución directos Aislados (Reahu 2012).....	19
Figura 5: Distribución Techelmann (Reahu 2012).....	20
Figura 6: Distribución Bloque Techelmann (Reahu 2012).....	21
Figura 7: Ubicación geográfica.....	29
Figura 8: Ubicación del predio del edificio ADIUC.....	29
Figura 9: Planta de ADIUC.....	29
Figura 10: Fachadas principal y secundaria de ADIUC.....	29
Figura 11: Fotos del edificio (exteriores e interiores).....	30
Figura 12: (a) Detalle de la sección transversal de la envolvente. (b) corte longitudinal de la edificación con detalle de estructura.....	31
Figura 13: Variación de la temperatura en función de la profundidad (Lannelli y otros, 2013).....	31
Figura 14: clasificación bio-ambiental. IRAM 11603.....	40
Figura 15: Pestañas de datos del programa BT6 de Dilasoft.....	42
Figura 16: Detalle constructivo cerramiento interior.....	44
Figura 17: Detalle constructivo cerramiento exterior.....	45
Figura 18: Detalle constructivo de cubierta.....	46
Figura 19: Gráfico de Temperatura vs. Efectividad.....	51
Figura 20: Temperatura vs. Longitud del Tubo en condiciones de verano.....	53
Figura 21: Temperatura vs. Longitud del Tubo en condiciones de invierno.....	53
Figura 22: Longitud del tubo vs. Velocidad del aire, en condiciones de verano...56	
Figura 23: Longitud del tubo vs. Velocidad del aire, en condiciones de invierno.	
	.¡Error! Marcador no definido.
Figura 24: Comparación de las temperaturas máximas con la implementación del sistema y sin él.....	63
Figura 25: Gráfico con variación de la conductividad térmica.....	64

CAPÍTULO 1: DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

1.1. Ámbito de desarrollo

La Práctica Supervisada (PS) se llevó a cabo en el Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos de la FCEFyN de la UNC. Durante la ejecución del mismo se utilizaron y aplicaron conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera de Ingeniería Civil.

Las tareas e investigaciones se realizaron con el objetivo de evaluar cuáles son los beneficios del aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía.

Además de conocer cuáles son los diferentes métodos para su aplicación, para de esta forma poder obtener un sistema de climatización de ambientes sustentable y ecológicamente amigable.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la implementación de la geotermia de baja entalpía en suelos loésicos como método de ayuda a la climatización que sea sustentable y económico. Además de reducir la contaminación, el sistema es aplicable en diversos lugares ya que hace aprovechamiento de la energía de la tierra.

Como objetivos específicos podemos enunciar:

- ❖ Calcular del balance térmico tanto en condiciones de verano como en invierno.
- ❖ Determinar las transmitancia térmica de los elementos intervinientes en balance térmico.
- ❖ Realizar una modelación de la aplicación del método al edificio y analizar los resultados.
- ❖ Ejecutar un análisis económico.
- ❖ Hacer una comparación entre los resultados obtenidos y los de la casa BAFT ubicada en Buenos Aires.

1.3. Actividades desarrolladas

Durante la realización de la Práctica Supervisada, se desarrollaron las siguientes actividades:

- ❖ Análisis bibliográfico y de antecedentes.
- ❖ Estudio de los distintos métodos utilizados y su aplicación en geotermia de baja entalpía.
- ❖ Elección del método y cálculo para el lugar de emplazamiento del edificio.
- ❖ Análisis de resultados.

1.4. Aplicación de conocimientos de la carrera de Ingeniería Civil

Para poder desarrollar la Práctica Supervisada se utilizaron conocimientos aprendidos en las siguientes materias durante el cursado de la carrera de Ingeniería Civil:

“Física I” y “Termotecnia”, cursadas en primer y segundo año, permitieron entender el fenómeno de la transferencia de calor y sus modos.

“Geotecnia II”, de segundo año, proveyó las metodologías y procedimientos de ensayo para la clasificación de suelos.

“Instalaciones en Edificios I y II”, en el cuarto año, se aprendió a calcular sistemas artificiales de calefacción y refrigeración, balances térmicos de los edificios, como también la importancia del uso racional de los mismos.

“Proyecto, evaluación y dirección de Obras”, cursada en el quinto año, se incorporaron conocimientos para el desarrollo de proyectos de inversión.

1.5. Organización del informe

Este informe está compuesto por 6 capítulos.

El **Primer Capítulo** consiste en un marco de desarrollo de la Práctica Supervisada, se indican las actividades y objetivos de la PS.

El **Segundo Capítulo** consta de un análisis sobre la situación energética de Argentina, junto con su matriz y luego se realiza una descripción de las energías renovables más destacadas.

En el **Tercer Capítulo** se realiza una introducción teórica sobre la energía geotérmica y los métodos que se utilizan para el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía.

En el **Cuarto Capítulo**, se presenta una descripción del lugar de emplazamiento, características técnicas del edificio y propiedades de los materiales utilizados, así como también las propiedades térmicas de los materiales intervinientes y del suelo. Se determina el balance térmico del edificio.

En el **Quinto Capítulo** se presentan los resultados obtenidos junto con el diseño y la implementación del sistema de captación en el edificio. Luego se realiza un análisis sobre el ahorro energético obtenido por la aplicación del sistema.

Finalmente, en el **Sexto Capítulo** se exponen las principales conclusiones alcanzadas en este trabajo y en se detalla el material teórico consultado para el desarrollo de este informe.

CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN

2.1. Crisis energética en el mundo

Es de público conocimiento el crecimiento exponencial de la población en las últimas décadas, lo que deriva, entre otras cosas, al mayor consumo de energía. Esto trae como consecuencia el agotamiento de recursos naturales y un fuerte impacto sobre el medio ambiente. Para poder disminuir este efecto, es importante conocer el uso eficiente de la energía, de ahí la búsqueda de nuevas alternativas para su obtención (Bustos, 2015).

Desde el origen del hombre, se han utilizados los recursos que la Tierra proveyó: carbón, gas, madera, petróleo los cuales son No Renovables, es decir que a medida que se van consumiendo disminuyen sus reservas sin posible reposición, salvo que se descubran nuevos yacimientos. Esto último ocurre, pero lo que se descubre es menos que lo que se consume y generalmente su explotación requiere de tecnología sofisticada y costosa. Si consideramos además los efectos que estos producen al ambiente y a la salud de la población, es de gran importancia poder desarrollar nuevas tecnologías y fuentes de energía que sean Renovables. Dentro de las energías renovables se pueden nombrar: eólica, hidroeléctrica y solar, son las más reconocidas y sobre las cuales se han realizados estudios y proyectos de gran envergadura.

También existe una gran variedad de energías menos conocidas que están ganando importancia, se puede nombrar entre ellas: biomasa, energía mareomotriz y por última, la de nuestro estudio, la energía Geotérmica.

Además del trabajo necesario para suplir el déficit en la generación de energía, promoviendo el uso de energías renovables, es fundamental conseguir que la demanda de energía deje de crecer a un ritmo incontrolado, utilizando políticas activas que impulsen el Uso Racional y Eficiente de la Energía (UREE) y promoviendo la concientización y el cambio de hábitos hacia un consumo de energía más sustentable.

2.2. Situación en la Argentina

La Argentina es un país rico y diverso en cuanto a sus recursos energéticos, sin embargo, actualmente depende de los combustibles fósiles y se ve obligado a importar energía (Bustos, 2015).

En los últimos años la Argentina ha incrementado sus emisiones de gases de efecto invernadero por el crecimiento de la demanda energética y de la participación de los hidrocarburos en la generación de energía eléctrica. En la última década se produjo un incremento del 80% de las emisiones de CO₂ del sistema eléctrico.

Según la ley 27.191, Ley de Energía Eléctrica promulgada en la Argentina en el año 2015, para el año 2017 el país deberá contar con un 8% de energías renovables, y para el 2025 con un 20%. La ley define como renovable a la energía eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, mareomotriz (generada por las olas), de las corrientes marinas, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración, biogás y biocombustibles, y a la hidroeléctrica, pero sólo de pequeña escala (Strelin, 2012).

La ley 27.191 considera como renovable a la energía hidroeléctrica de hasta 50 MW; correspondiendo a pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, con embalses con poca capacidad de almacenamiento o directamente centrales sin embalse.

De acuerdo a la Dirección Nacional de Energías Renovables del Ministerio de Energía se han identificado actualmente en Argentina 120 proyectos de energías renovables, y un relevamiento realizado para la COP 21 (Conferencia sobre el cambio climático en París), en el 2015 se presentaron ante la Cámara Argentina de Energías Renovables (CADER) 978 proyectos de energías renovables por aproximadamente 4800 MW de potencia que esperan líneas de crédito accesible para comenzar y otros por 4510 MW que además deben definir la forma de implementación. Estos proyectos se encuentran distribuidos en todo el país y corresponden a diversas tecnologías:

- *Eólica*: en Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz, Mendoza, Santiago del Estero, Córdoba, La Rioja, La Pampa y Buenos Aires.
- *Solar*: fotovoltaica en Santa Fe, Córdoba, La Rioja, Mendoza, San Juan y Buenos Aires.

- **Biogás:** Santa Fe, San Luis, Córdoba, Salta, Chubut, Santa Cruz, Tierra Del Fuego, Entre Ríos y Buenos Aires.

- **Biomasa:** Misiones, Entre Ríos, Santa Fe, Corrientes, Buenos Aires, Tierra del Fuego, Jujuy, Córdoba, San Luis, Chubut, San Juan, Neuquén, Chaco.

2.3. Matriz energética de Argentina

Las fuentes de energía se denominan primarias cuando se extraen de la naturaleza, sea en forma directa o (como la energía hidráulica) o mediante un proceso de extracción o recolección (como el petróleo) es decir, no fueron sometidas a ninguna modificación. Las secundarias son el resultado de un proceso de transformación por medio de la aplicación de una tecnología (como es el caso de la electricidad).

La Matriz Energética de Argentina para el 2015, último año del que se dispone información, está representada en la Figura 1. Puede notarse que la gran mayoría de la energía que consumió el país en ese año, fue de origen no renovable (88,5 %), y que las principales fuentes fueron petróleo y gas natural. También se puede decir que el consumo de energías renovables creció en aproximadamente 1% en comparación con el año 2013 (Renovables 10,63%).

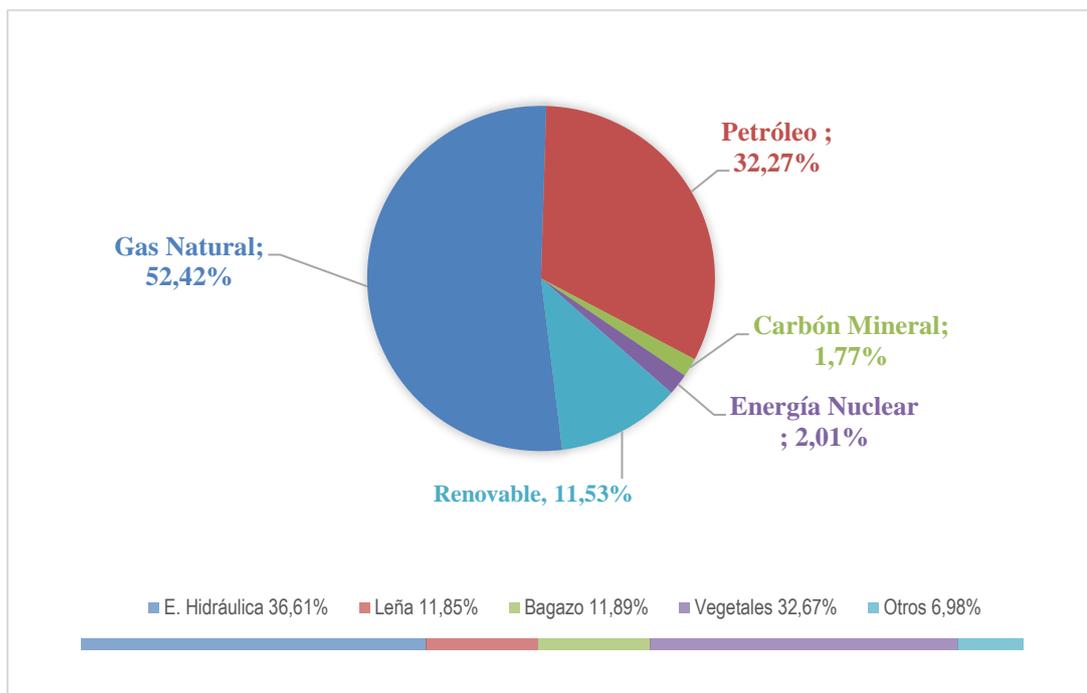


Figura 1: Matriz Energética de Argentina correspondiente al año 2015 (Secretaría de Energía de La Nación).

2.4. Energías renovables

Las energías renovables son conocidas también como blandas o alternativas, dentro de ellas se engloban las: eólica, hidroeléctrica, solar, biomasa, energía mareomotriz y geotérmica.

Con la excepción de la geotermia, la totalidad de las energías renovables derivan directa o indirectamente de la energía solar. Directamente en el caso de la luz y el calor producidos por la radiación solar, e indirectamente en el caso de las energías eólica, hidráulica, mareas, olas y biomasa, entre otras. Actualmente suministran un 20% del consumo mundial (Santamarta, 2010).

Energía Solar: fuente de energía que se obtiene del sol y con la que se puede generar calor y electricidad. Existen varias maneras de aprovechar los rayos del sol para generar energía que dan lugar a los distintos tipos de energía solar: la fotovoltaica (que transforma los rayos en electricidad mediante el uso de paneles solares), la fototérmica (que aprovecha el calor a través de los colectores solares) y termoeléctrica (transforma el calor en energía eléctrica de forma indirecta).

Energía eólica: utiliza la fuerza del viento para generar electricidad. El principal medio para obtenerla son los aerogeneradores, de tamaño variable que transforman con sus aspas la energía cinética del viento en energía mecánica. La energía del viento puede obtenerse instalando los aerogeneradores tanto en suelo firme como en el suelo marino. En general, las zonas costeras y las cumbres de las montañas son las más favorables y mejor dotadas para el aprovechamiento del viento con fines energéticos.

Energía Hidroeléctrica: se genera haciendo pasar una corriente de agua a través de una turbina. La electricidad generada por una caída de agua depende de la cantidad y de la velocidad del agua que pasa a través de la turbina. El aprovechamiento eléctrico del agua no produce un consumo físico de ésta, pero puede entrar en contradicción con otros usos agrícolas o de abastecimiento urbano, y sobre todo, las grandes centrales tienen un gran impacto ambiental. La central en si no es contaminante, sino su construcción provoca numerosas alteraciones del territorio y de la fauna y flora.

Biomasa: es la que se obtiene de los compuestos orgánicos mediante procesos naturales. Con el término biomasa se alude a la energía solar, convertida en materia orgánica por la vegetación, que se puede recuperar por combustión directa o transformando esa materia en otros combustibles, como alcohol, metanol o aceite. También se puede obtener biogás, de composición parecida al gas natural, a partir de desechos orgánicos.

Energía Geotérmica: es una fuente de energía renovable que aprovecha el calor que existe en el subsuelo de nuestro planeta. Sus principales aplicaciones se dan en nuestra vida cotidiana: climatizar y obtener agua caliente sanitaria de manera ecológica tanto en grandes edificios (oficinas, fábricas, hospitales, etc.) como en viviendas.

CAPÍTULO 3: ENERGÍA GEOTÉRMICA

3.1. Introducción

El gradiente térmico resultante de las altas temperaturas del centro de la tierra (superiores a los mil grados centígrados), genera una corriente de calor hacia la superficie, corriente que es la fuente de la energía geotérmica.

Este tipo de energía se puede clasificar en función de las temperaturas:

- Alta Temperatura $T^a > 150^{\circ}\text{C}$

Son yacimientos de aguas confinadas a altas temperaturas en terrenos con actividad magmática reciente o residual que actúa de foco de calor. Se localizan entre los 1500 y 3000 metros de profundidad.

- Media Temperatura $150^{\circ}\text{C} > T^a > 90^{\circ}\text{C}$

Son yacimientos con unas temperaturas entre los 90 y 150°C que se sitúan en cuencas sedimentarias. Se localizan entre los 1000 y 3000 metros. Las fracturas del terreno pueden hacer que ascienda agua caliente hasta la superficie dando lugar a los clásicos manantiales termales.

- Baja Temperatura $90^{\circ}\text{C} > T^a > 25^{\circ}\text{C}$
- Muy Baja Temperatura (o baja entalpía) $25^{\circ}\text{C} > T^a$

Las dos clasificaciones anteriores son yacimientos que se sitúan a niveles cerca de la superficie, estos aprovechan la diferencia de temperatura entre el suelo y la superficie.

Con lo mencionado anteriormente se puede concluir que la geotermia incluye desde aprovechamientos geotermiales con agua hasta otros de baja entalpía que utilizan la diferencia de temperatura entre la superficie y el subsuelo.

3.2. Aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía

En cualquier punto de la superficie del planeta se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo, a pocos metros de profundidad, o en acuíferos poco profundos, para la climatización de casa individuales y edificios por intermedio de bombas de calor geotérmicas.

La energía geotérmica de baja entalpía basa sus aplicaciones en la capacidad que posee el subsuelo de acumular calor y de mantener una temperatura sensiblemente constante a lo largo de todo el año (dicha temperatura rondará los 15°C variando en función de la zona considerada).

A una profundidad menor, la temperatura se ve afectada por el clima exterior, como se puede apreciar en la siguiente figura:

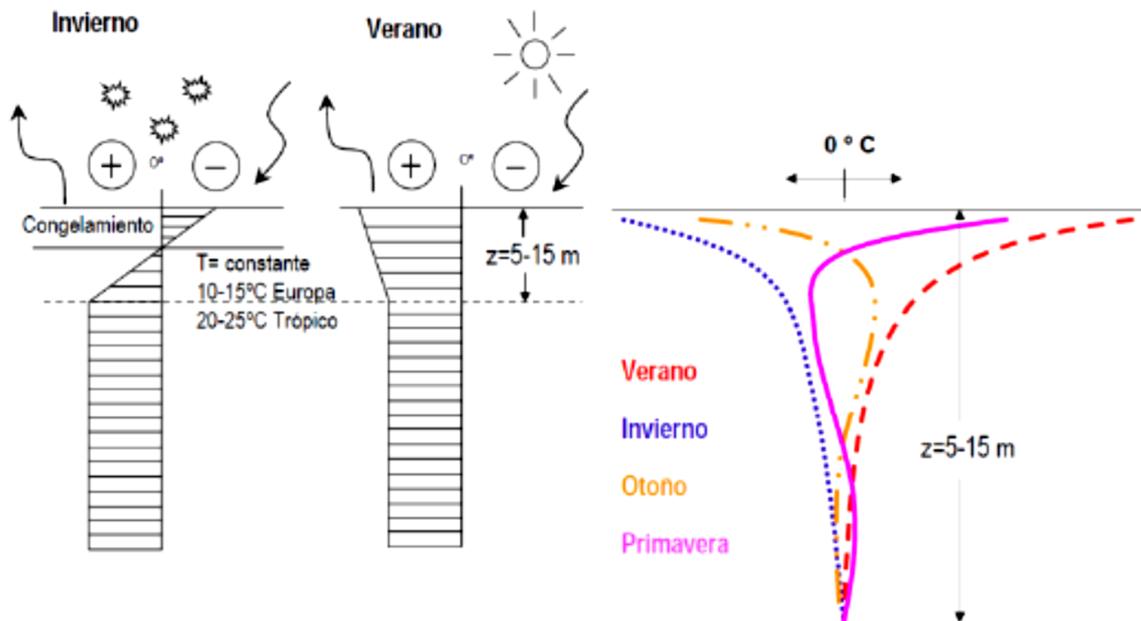


Figura 2: Datos referidos al gradiente térmico (Ingesolum, 2008)

Ventajas de la Geotermia de Baja entalpía:

- *Beneficios Medioambientales:* El consumo de combustibles fósiles genera consumo de oxígeno y liberación de Dióxido de Carbono, lo que produce un gran aumento en las emisiones de gases que intensifican el efecto invernadero. Otro gas de gran importancia es el metano, el cual está relacionado a la producción y consumo de gas natural, filtraciones de petróleo, entre otras causas. El uso de la energía geotermia como herramienta de calefacción no genera Dióxido de Carbono ni Metano.
- *Independencia energética:* al disponer de un sistema de aprovechamiento de energía de baja entalpía permite disponer de sus beneficios en cualquier momento, sin importar eventuales crisis de petróleo o crisis energéticas e incluso la falta de energía eléctrica.
- *No inflamable:* El sistema funciona sin combustión, lo cual es riesgo de algún accidente más grave.
- *Disponibilidad:* No está localizado como los combustibles fósiles, sino que se cuenta con una amplia distribución y en concreto la energía geotérmica de muy baja entalpía es una energía local, para consumir sobre el propio terreno. No requiere de características excepcionales del terreno, es independiente de

condiciones meteorológicas y ambientales lo que le dota de continuidad y estabilidad.

➡ **Sistemas de captación de la energía de baja entalpía**

Se utilizan sistemas que consisten en tubos enterrados que permiten utilizar las inercias térmicas diarias y estacionales en el subsuelo, haciéndolo funcionar como un sistema de intercambio de calor.

Se aprovecha la característica del suelo de mantener la temperatura interior frente a los cambios exteriores, por la cual se consigue una temperatura constante de 15° C en cualquier parte del mundo, de día o de noche, en invierno o en verano (Hollmuller & Lachal, 2005).

Para poder desarrollar estos sistemas, se deben tener en cuenta ciertas características del suelo que son las que permiten la transferencia de calor:

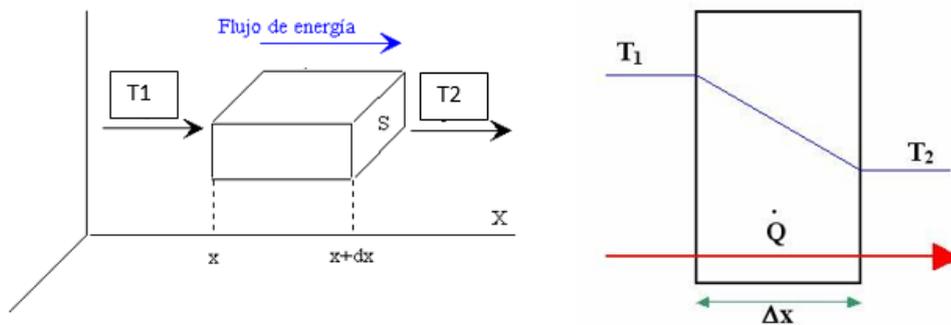
✓ Conductividad térmica del terreno

Esta propiedad es clave en el diseño, se define como la capacidad de conducción de calor. Es característica del material, se mide en W/m°C, e interviene en la ecuación de conducción (

$$Q = A \frac{dT}{dX}$$

Figura 3)

Esquema para la obtención de la Ley de Fourier



$$Q = A \frac{dT}{dX}$$

Figura 3: Transporte de energía por conducción. (Ley de Fourier)

En la expresión de la Figura 3, **Q** hace referencia al calor difundido por unidad de tiempo, **A** el área y **dT/dx** es el gradiente de temperatura.

✓ Capacidad calorífica: Propiedad térmica del suelo para almacenar calor. Cambia la temperatura, pero sin cambiar de fase.

El sistema se basa en un fenómeno físico por el que el aire solo necesita unos instantes para atravesar el dispositivo (tubo), y sale con una temperatura adecuada dependiendo de la época del año.

Una vez conocida las propiedades del terreno, se debe determinar cuál de las configuraciones del método es la más adecuada para implementar.

Dentro de las cuales se pueden destacar:

❖ **Pozo Canadiense o provenzal:** es una instalación geotérmica de baja temperatura y poca profundidad capaz de aprovechar las temperaturas estables de la capa superficial del subsuelo para proporcionar a las viviendas aire fresco en verano y más caliente en invierno.

Esta técnica consiste en enterrar unos conductos a una profundidad entre 1,5 m y 5 metros en el subsuelo y hacer circular por ellos aire. Este aire, en contacto con las tuberías, adquiere la temperatura del subsuelo, ya sea ésta mayor o menor a la externa y luego se hace circular, con o sin aporte térmico adicional, por el interior de la vivienda.

Se han llegado a determinar tres tipos diferentes de configuración de sistemas de tubos enterrados: tipo bloque Techelmann (bloque – rejilla), distribución Techelmann (rejilla) y directos aislados (anillo). Estos tipos de distribución varían entre sí por el número, y la distribución de los de los tubos horizontales (Rehau, 2012).

✓ Directos Aislados (Anillo)



Figura 4: Distribución directos Aislados (Reahu 2012)

- Aplicaciones: su mayor aplicación es en viviendas familiares y/o construcciones pequeñas. No obstante, ha sido utilizado en escuelas, auditorios, naves industriales, etc. Se aplica este diseño porque resulta rentable y se puede economizar al poder utilizar trincheras existentes en vez de re-excavar (Rehau, 2012).

- Sistema constructivo: Su instalación está formada por uno o dos tubos, que están direccionados hacia la cámara central, en donde se encuentra el ventilador que impulsa todo el sistema, y esta a su vez se conecta directamente a la torre de salida del aire. El material de los tubos puede ser de PVC con chapa de acero (Rehau, 2012).

Ejemplo de aplicación: Casa BASF, University off Nottingham.

Descripción del Proyecto: Todos los sistemas y diseños de la vivienda fueron pensados en un contexto de sostenibilidad y contemplan las siguientes categorías: eficiencia energética (CO₂), uso eficiente del agua, uso eficientes de materiales, gestión de Agua Superficial, gestión de residuos del sitio y polución (Rehau, 2012). La casa tiene una superficie compacta y el diseño se basó en otro diseño solar pasivo extremadamente simple. La construcción tiene fachadas hacia el norte, este y oeste, y está muy bien aislada con el número mínimo indispensable de aperturas para proveerla de luz natural. La fachada sur es totalmente acristalada con un cristal doble capa. Esta abertura permite calentar la vivienda en época de invierno. Toda la construcción cuenta con sistemas de ventilación cruzada, y tubos enterrados para un correcto funcionamiento dependiendo la época del año (Rehau, 2012).

✓ Distribución Techelmann (rejilla)

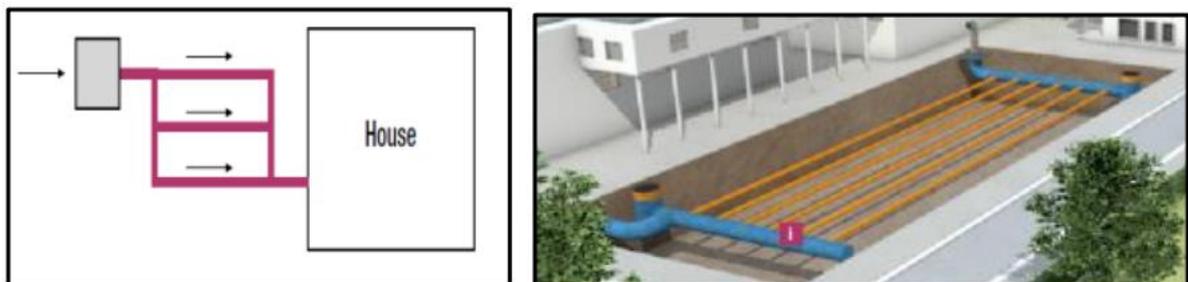


Figura 5: Distribución Techelmann (Reahu 2012)

- Aplicaciones: es utilizado cuando la distribución tipo aislada no se puede realizar debido a que la longitud total de los tubos es muy grande porque existe un mayor volumen de flujo requerido, renovaciones y confort térmico (Rehau, 2012).

- Sistema constructivo: el material utilizado para los tubos verticales (ingreso y salida del aire) y los que conforman la rejilla varía dependiendo de los requerimientos del proyecto, pero por lo general pueden ser de PVC y/o de hormigón. Este tipo de sistemas son colocados en edificaciones de gran escala, y por esta razón es muy importante tomar en cuenta que las galerías de ingreso y

salida del aire deben tener un sistema de evacuación de agua (sea por infiltración del terreno o condensaciones de la tubería). El sistema de tubos enterrados debe trabajar en conjunto con una climatizadora y/o una unidad de tratamiento de aire; la cual permite regular el caudal y velocidad de aire necesario, y también ayuda a cubrir las demandas pico de la construcción que no pueden ser satisfechas solo con los tubos enterrados (Rehau, 2012).

Ejemplo de aplicación: TESCO supermercado en Polonia

Descripción del Proyecto: Tiene un consumo anual de 46.320 kWh, y el diseño del intercambiador de calor tierra-aire proporciona un ahorro en consumo de calefacción en 20.500 kWh por año. Para comprobar los valores calculados, la empresa que lo aplicó ha optado por llevar a cabo un proyecto de investigación de un año en relación al sistema en cooperación con la Universidad Técnica de Posen (The Building Center, 2008).

✓ **Bloque Techelmann (bloque – rejilla)**

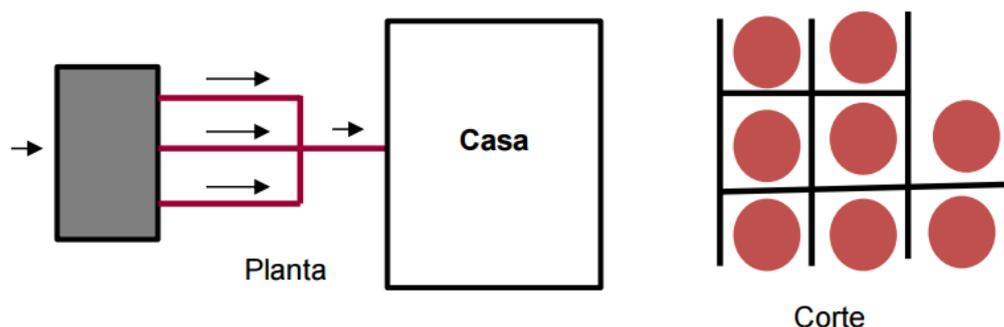


Figura 6: Distribución Bloque Techelmann (Reahu 2012)

Este sistema conjuga los dos métodos antes descritos, pero implementándolos en un espacio limitado; por esta razón se construye su sección como un bloque con varias capas de tubos. Al diseñar este tipo de sistemas es de suma importancia analizar la inercia térmica de todo el bloque porque un mal diseño no permitirá un adecuado intercambio de calor del flujo (The Building Center, 2008).

Las configuraciones anteriormente mencionadas, constan de los siguientes componentes:

⇒ **Punto de captación del aire:** Es donde el sistema toma el aire del exterior. Esta toma, se deberá situar ligeramente en alto (1m o 1,5 m) para evitar la captación de aire contaminado. Por esta misma razón se eligen áreas de captación donde el aire se mantenga en movimiento, allí se evitan las hondonadas donde el aire quede

estancado. La entrada debe contar con una rejilla que imposibilite el acceso al sistema de insectos, roedores o cualquier otro animal que puedan hacer nido en su interior o depositar excrementos y suciedad que puedan contaminar el sistema.

⇒ **Intercambiador de calor:** Es el elemento que transfiere el calor del subsuelo al aire. Se trata en definitiva de la tubería enterrada. La longitud y el diámetro del conducto podrá ser de diferentes tamaños en función de aspectos como la profundidad, naturaleza del terreno, potencia del elemento que succiona el aire, las necesidades térmicas que se necesiten, entre otros. Es de fundamental importancia la naturaleza del terreno y de su transmisividad de calor (capacidad del suelo para transmitir calor a otro cuerpo).

Cuanto mayor sea la longitud del tubo, mayor transferencia térmica aire-suelo se producirá. Los valores más usados oscilan entre los 10 y los 100 metros de longitud. Para el diámetro de la tubería los valores recomendados oscilan entre los 20 y los 40 cm. de diámetro.

El conducto o tubería deberá ser impermeable, estanco, liso, resistente mecánicamente a la presión y a la deformación del terreno. También deberá resistir la corrosión. Por último, deberá tener buena conductividad térmica (es decir que permita pasar el calor a través de sí mismo o lo que es lo mismo, que sea lo menos aislante térmico posible) para que permita las transferencias de calor entre el terreno y aire del interior del conducto.

El material recomendado, es el PVC, un material muy adecuado para este tipo de construcciones, ya que presenta una conductividad térmica razonable y es viable económicamente.

⇒ **Elemento de circulación del aire:** El aire necesitará de un elemento que lo impulse y lo haga circular por las tuberías enterradas. En este punto, y dependiendo de lo que se pretenda conseguir, se pueden optar por elementos activos (mecánicos) o pasivos (chimenea solar).

Como elemento activo, puede tratarse de un pequeño ventilador o extractor de potencia adecuada que succione el aire de las tuberías y lo haga circular.

⇒ **Punto de drenaje:** Se recomienda prever el drenaje de la misma. Para lograr esto, se inclina el tubo con una pendiente de 2% - 5% y se proporciona un desagote en el codo. Dicho desagote podrá dar a un lecho de piedras o a un depósito donde luego se extrae con una bomba o infiltra en el subsuelo.

⇒ **Filtros:** Son los encargados de purificar el aire y con ello evitar la entrada de polvo y suciedad al interior de los conductos (alternativos).

Rendimiento de los pozos: por sí solos resultan muy eficientes en la refrigeración en verano, haciendo que puedan sustituir perfectamente a los convencionales sistemas de aire acondicionado.

En invierno, en cambio, los pozos pueden resultar insuficientes por si solos para aportar el calor necesario para la climatización de un edificio dependiendo de la latitud. Sin embargo, pueden ofrecer un muy importante precalentado del aire lo que supondrá un sustancial ahorro, ya que el salto térmico que tendrá que aportar el sistema de climatización artificial se verá reducido.

Mantenimiento: Los intercambiadores deben estar equipados con filtros que impidan la entrada de partículas a la zona climatizada. El mantenimiento de los mismos debe ser el adecuado.

El riesgo de condensación en el interior de los pozos provenzales, canadienses o en intercambiadores es un riesgo a tener muy en cuenta. La existencia de humedades no tratadas en el sistema puede ocasionar el crecimiento de mohos y la generación de malos olores. El sistema debe ser accesible para permitir su lavado. Una frecuencia anual parece razonable (Escuer Gomis, 2007).

3.3 Dimensionado y forma de cálculo

En la literatura se encuentran varios modelos de cálculos para intercambiadores de calor tierra-aire. Tzaferis y otros (1992) estudiaron ocho modelos. Los autores clasificaron los algoritmos en dos grupos: el primero calcula la transferencia de calor desde el aire de circulación a la tubería y luego calcula la transferencia de calor de la tubería al suelo. Los datos de entrada necesarios son: las características geométricas del sistema, las características térmicas de la tubería y del suelo, la temperatura del suelo durante el funcionamiento del sistema (Paepe y Janssens, 2002).

La resolución de la mayoría de los métodos citados es muy compleja y su resolución se hace por medio de herramientas matemáticas.

En la mayoría de los casos, los intercambiadores de calor tierra-aire son sólo un componente en un sistema de edificios enteros. Los diseñadores no tienen mucha libertad de elección para determinar el tamaño y la disposición del

intercambiador de calor. Están limitadas por las restricciones de espacio y las condiciones económicas de los límites. Necesitan una manera simplificada de predecir el rendimiento general del intercambiador de calor. Su principal objetivo es poder seleccionar un tamaño razonable del diámetro, longitud de la tubería y número de tubos.

Análisis de los parámetros de diseño:

Los requerimientos de diseño se logran calentando o enfriando el aire de ventilación en la tubería enterrada desde la temperatura del aire exterior hasta la temperatura del suelo en el interior de la tubería (Paepe y Janssens, 2002). Por lo tanto, es preciso conocer:

- m_{air} : El caudal másico de aire
- $T_{air,in}$: La temperatura del aire de entrada
- $T_{air,out}$: La temperatura del aire de salida después del intercambiador de calor
- T_{ground} : La temperatura del suelo

El caudal másico de aire y la temperatura del aire de salida se fijan por el requerimiento de diseño. La temperatura del aire de entrada y la temperatura del suelo siguen las condiciones climáticas de diseño del problema.

La temperatura del suelo se define por el clima y por la composición del suelo. La fluctuación de la temperatura del suelo disminuye con el aumento de la profundidad de los tubos.

Dimensiones del intercambiador de calor:

Los parámetros de dimensionamiento geométrico de un intercambiador de calor tierra-aire son:

- D: diámetro del tubo.
- L: longitud del tubo.

Para el diseñador, estos parámetros deben determinarse de tal manera que se cumplan las condiciones límite y el rendimiento del disipador de calor.

Eficiencia del intercambiador de calor y NTU

En el intercambiador de aire aire-tierra el aire es el único fluido de transporte de calor. El calor liberado o absorbido por el aire fluye a través de las paredes de la tubería al suelo circundante. El calor total transferido al aire cuando fluye a través de un tubo enterrado puede escribirse como:

$$Q = \dot{m}_{air} C_{p,air} (T_{air,out} - T_{air,in}) \quad (1)$$

Dónde: $C_{p,air}$: Capacidad térmica del aire.

Debido a la convección entre la pared y el aire, el calor transferido también puede escribirse como:

$$Q = hA\Delta T \quad (2)$$

h : el coeficiente de convección del aire dentro del tubo

A : Sección transversal del tubo.

ΔT : Diferencia de temperaturas.

Se considera que la conductividad de la tubería es mucho menor a la del suelo, en consecuencia, la temperatura de la pared del tubo es igual a la del suelo (Paepe y Janssens, 2002).

$$\Delta T_m = \frac{(T_{air,in} - T_{wall})(T_{air,out} - T_{wall})}{\ln[(T_{air,in} - T_{wall})/(T_{air,out} - T_{wall})]}$$
$$\Delta T_m = \frac{(T_{air,in} - T_{air,out})}{\ln[(T_{air,in} - T_{wall})/(T_{air,out} - T_{wall})]}$$
$$T_{ground} = T_{wall}$$

Igualando las ecuaciones (1) y (2) da la relación exponencial para la temperatura de salida del aire en función de la temperatura de la pared y la de entrada:

$$T_{air,out} = T_{wall} + (T_{air,in} - T_{wall})e^{-\left(\frac{hA}{m_{air}C_{p,air}}\right)} \quad (3)$$

Si se utiliza una tubería de longitud infinita ($A = \infty$), el aire se calienta o enfría a la temperatura de la pared. La eficacia del intercambiador de calor aire-aire se puede definir así:

$$\epsilon = \frac{T_{air,out} - T_{air,in}}{T_{wall} - T_{air,in}} \quad (4)$$

Utilizando la ecuación (3), la eficiencia se convierte en:

$$\epsilon = 1 - e^{-\left(\frac{hA}{m_{air}C_{p,air}}\right)} \quad (5)$$

El valor exponencial de ϵ se llama "numero de transferencia de unidades" (NTU):

$$NTU = \frac{hA}{m_{air}C_{p,air}} \quad (6)$$

La ecuación (5), queda expresada: $\epsilon = 1 - e^{-NTU}$ (7)

Existen varias maneras de construir un intercambiador de calor tierra-aire, para obtener un NTU dado y por lo tanto una efectividad deseada. Ahora se estudiará la influencia de los parámetros de diseño en NTU.

NTU también puede ser expresada considerando las propiedades térmicas de los componentes intervinientes en el intercambiador, expresado de la siguiente forma:

$$NTU = \frac{UA}{m_{air}c_{p,air}} \quad (8)$$

Dónde: UA: Conductividad térmica total (W/K).

A su vez UA depende de las resistencias térmicas de los materiales intervinientes, como ser el suelo, el tubo y el aire; y de las propiedades geométricas.

$$\frac{1}{UA} = R_{suelo} + R_{tubo} + R_{aire} \quad (9)$$

$$R_{aire} = \frac{1}{Nu\lambda_a\pi L} \quad (10)$$

$$R_{tubo} = \frac{\ln(D_e/D_i)}{\lambda_{tubo}2\pi L} \quad (11)$$

$$R_{suelo} = \frac{\ln[(D_e+2p)/D_i]}{\lambda_{suelo}2\pi L} \quad (12)$$

Donde; Nu: número de Nusselt

λ_x : Conductividad térmica de cada elemento.

L: longitud del tubo.

R: resistencia térmica.

Influencia en la transferencia de calor

El NTU consta de tres parámetros que pueden variar:

- h: el coeficiente de convección del aire dentro del tubo
- A: Sección transversal del tubo
- m_{air} : el caudal másico de aire

El área depende del diámetro y de la longitud, El coeficiente de convección dentro de un tubo se define por:

$$h = \frac{Nu\lambda}{D} \quad (13)$$

El número de Nusselt para el flujo dentro de un tubo viene dado por:

$$Nu = 3.66 \text{ si } Re < 2300 \quad (14)$$

$$Nu = \frac{\varepsilon/8(Re-1000)Pr}{1+12.7\sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{8}\right)\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)}} \quad (15)$$

$$\text{Donde } \varepsilon = (1.82\log Re - 1.64)^{-2} \quad (16)$$

Si $2300 \leq Re < 5 * 10^6$ y $0.5 < Pr < 10^6$

La ecuación (14) se aplica al flujo laminar completamente desarrollado. La ecuación (15) al flujo turbulento en tubos con superficie interna lisa. El número de Reynolds está relacionado con la velocidad y el diámetro promedio del aire:

$$R = \frac{v_{air}D}{\nu_{air}} \quad (17)$$

Donde: v_{air} = velocidad característica del aire

ν_{air} = viscosidad cinemática del aire

El caudal másico viene dado por:

$$m_{air} = \rho_{air} \frac{\pi D^2}{4} v_{air} \quad (18)$$

ρ_{air} = densidad del aire

La variación del diámetro D o el caudal másico m cambian la velocidad de aire dentro del tubo. Esto resulta una modificación del número Reynolds. Como NTU varía linealmente con L, el parámetro NTU / L sólo depende de D y m.

En general, la eficiencia es inversamente proporcional al diámetro (D). Así que, es mejor hacer varios tubos de pequeño diámetro sobre los que se divide el caudal.

CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO

4.1. Edificio a estudiar

El edificio a evaluar es de la Asociación de Docentes e Investigadores Universitarios de Córdoba (ADIUC), ubicado en la Ciudad Universitaria de Córdoba, en la esquina de Haya de la Torre y Nores Martínez en un predio de 4.500 metros cuadrados cedido por la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). El predio se encuentra ubicado en la Zona Bioambiental III Templada Cálida, sub zona IIIa Templada Cálida Seca con amplitudes térmicas mayores que 14°C según la norma IRAM 11603 (IRAM, 1996). Las coordenadas de su posición geográfica son 31° 26' 24" Latitud Sur y 64°11'00" Latitud Oeste con una elevación de 438m sobre el nivel del mar. El salón en estudio forma parte de esta construcción que cuenta además con otro taller, de menores dimensiones, una recepción, espacios de circulación, office, asador, depósito y áreas de transición. El edificio se caracteriza por ser utilizado por una amplia variedad de público en horarios diurnos para reuniones y asambleas.

La ciudad de Córdoba tiene un clima caracterizado por ser templado subtropical húmedo con invierno seco también conocido como pampeano, la misma tiene muchas diferencia entre sus estaciones. En el verano frecuentemente se producen tormentas eléctricas con viento y granizo. Según la norma IRAM 11603, en enero, mes más cálido del verano, la máxima media es de 30,7°C y la mínima media de 17,1°C con una humedad del 61%, en julio, mes más frío, la temperatura máxima media es de 19,5°C y 5,8°C de mínima con una humedad del 60%. Aún en invierno pueden ser frecuentes días algo cálidos.

El área en donde se encuentra emplazado el edificio es un área de la ciudad que está densamente edificada y ubicada en una depresión, es el núcleo de una importante isla de calor con una frondosa arboleda circundante. En la Figura 7, se muestra una imagen satelital con la ubicación del predio y del edificio. En las Figura 8 , Figura 9 y Figura 10 se presentan la planta y las fachadas del edificio. En la Figura 11 se observan fotografías de la edificación.

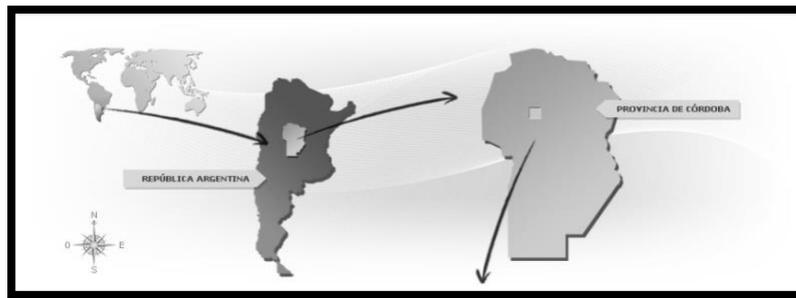


Figura 7: Ubicación geográfica.



Figura 8: Ubicación del predio del edificio ADIUC.

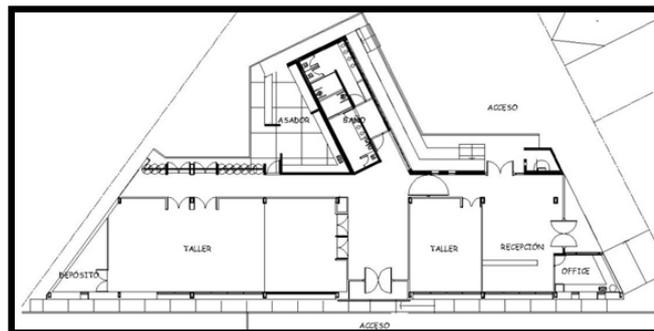


Figura 9: Planta de ADIUC

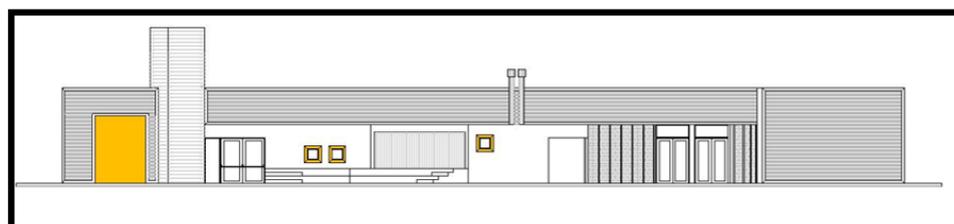
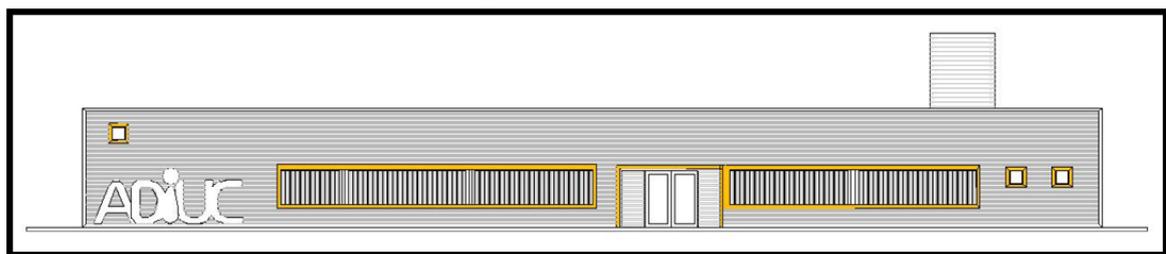


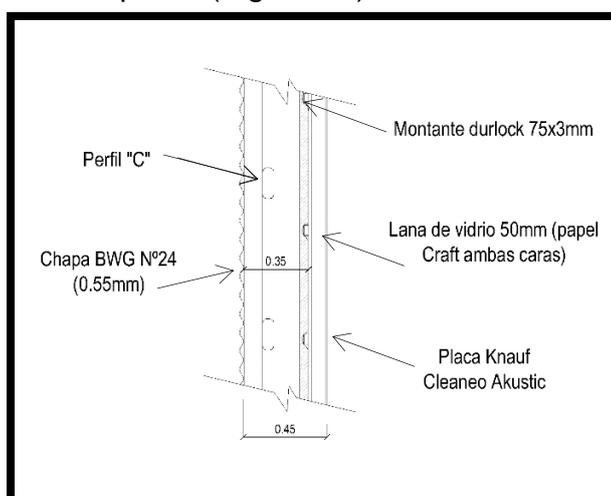
Figura 10: Fachadas principal y secundaria de ADIUC



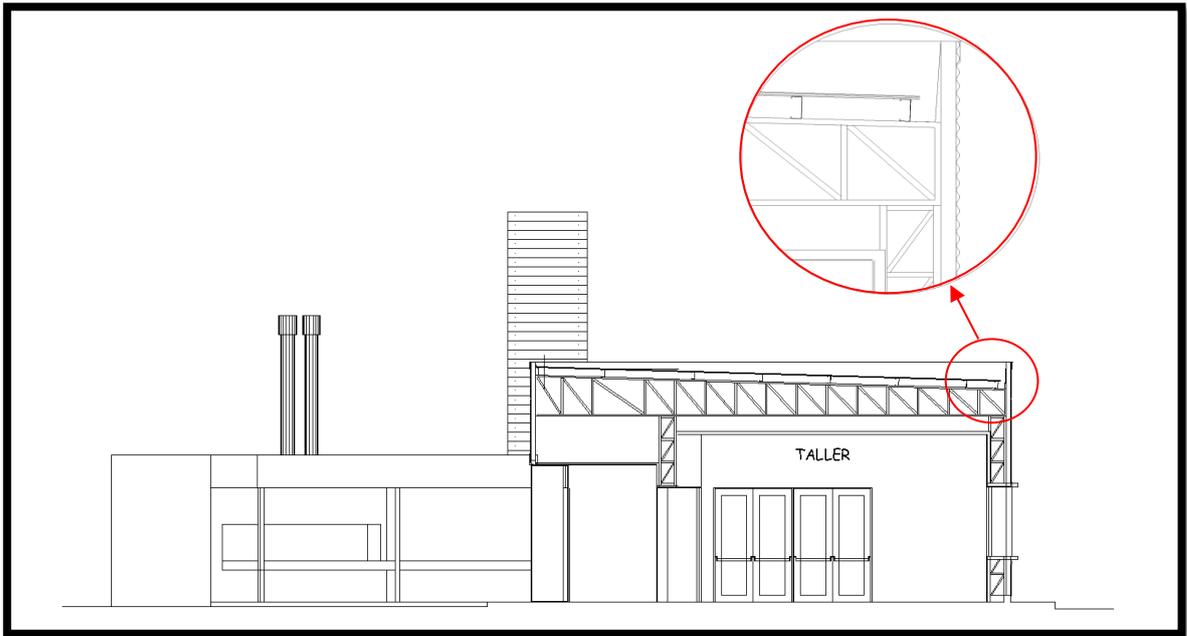
Figura 11: Fotos del edificio (exteriores e interiores).

4.2. Características técnicas del edificio

El salón en estudio tiene una superficie cubierta de 165 m² y una altura exterior de 4.35 m y 3.65 m interior. La envolvente perimetral está definida por carpintería metálica, no portante y en su interior las divisiones están realizadas con materiales livianos del tipo durlock. La envolvente se encuentra materializada por una chapa exterior acanalada con cámara de aire de 0.34 cm de espesor, seguido por una aislación de lana de vidrio continua (no dividida en los montantes) revestida en su interior con una placa de durlock, estableciendo en su conjunto un cerramiento vertical con 0.45 cm de espesor (Figura 12).



(a)



(b)

Figura 12: (a) Detalle de la sección transversal de la envolvente. (b) corte longitudinal de la edificación con detalle de estructura.

4.3. Temperaturas a considerar (para estimar en el subsuelo)

Todavía no existen estudios directos realizados sobre el suelo de la Provincia de Córdoba para tener valores exactos de las temperaturas en el subsuelo; pero a través de un trabajo de colaboración entre el Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS), Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y la Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM), un estudio permite caracterizar las propiedades térmicas del suelo en la provincia de Buenos Aires (L.Iannelli y otros, 2013).

Los valores obtenidos de ese estudio se pueden observar en la Figura 13.

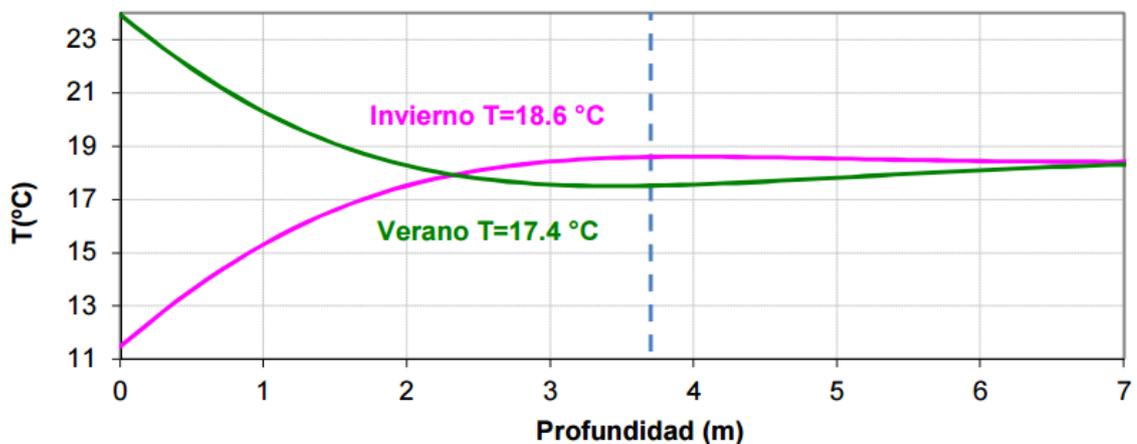


Figura 13: Variación de la temperatura en función de la profundidad (Lannelli y otros, 2013)

Si bien es importante destacar que los suelos de las provincias no son iguales, las provincias comparten una similitud en el clima, lo cual influye en las temperaturas del suelo del lugar.

Como se observa en el gráfico un poco más profundo (línea de puntos), se produce una inversión de temperatura. Es decir, a esta profundidad en verano el suelo está más fresco que el promedio y en invierno más cálido que el promedio ($\approx 17.7^{\circ}\text{C}$). Por lo tanto, esta profundidad sería la más propicia para enterrar los tubos.

Se adoptó 17°C para verano y 18°C para invierno, además de una profundidad de 2 metros, por cuestiones de diseño.

La temperatura del suelo se mantiene constante a medida que aumenta la profundidad, esto se debe a que próxima a la superficie las temperaturas se ven afectadas por el clima.

4.4. Características del suelo

El perfil del suelo del lugar, según el estudio geotécnico (Tabla 1), se compone desde la superficie hasta los 11 metros de profundidad de limos y limos arcillosos de baja plasticidad, algo húmedo de capacidad baja a media y humedades por debajo del límite plástico. Debajo de este suelo, hasta los 13 metros hay arena fina limosa intercalada con pequeñas capas de arena fina.

Tabla 1: Perfil del suelo, Francisca 2011

Prof. (m)	Perfil Geológico	SUCS	N° de Golpes
1	Limos y limos arcillosos castaño claro, de plasticidad baja, algo húmedo de capacidad baja a media y humedades por debajo del límite plástico	CL-ML	5
2		ML	12
3		ML	10
4		CL-ML	9
5		CL-ML	12
6		ML	12
7		CL-ML	21
8		ML	11
9		ML	14
10		ML	17
11		ML	15
12	Arena fina limosa intercalada con pequeñas capas de arena fina.	SM	16
13		SM	17
14	Limos y limos arcillosos color castaño oscuro con pequeños nódulos aislados, de consistencia media y humedad por encima del límite plástico.	ML	16
15		ML	15
16		CL-ML	15
17		ML	16
18		CL-ML	17
19		ML	17
20		CL	19

Por debajo de los 13 metros, se desarrolla un manto de limos arenosos consolidados, presentando niveles compactos con concreciones de coloración parda oscura. Por debajo, y hasta la finalización de los sondeos se observa un perfil compuesto por arena limosa consolidada compacta, intercalado con niveles granulares de arena media y grava.

Es importante destacar que no existe la presencia de agua, ya que el nivel freático se encuentra por debajo de los 20 metros.

4.5. Balance térmico

Se conoce que para que exista un flujo de calor, debe existir una diferencia de temperatura, el calor migrará desde el elemento de mayor temperatura al de menor.

Relacionando lo anterior, en un edificio se puede establecer que, dentro de un local, en invierno, el ambiente interior se encuentra a mayor temperatura que el exterior, por ende, el calor tenderá a escapar a través de la envolvente del lugar generando pérdidas de calor. En cambio, en verano, ocurre el fenómeno inverso. El calor tiene a ingresar al interior generando una ganancia de calor, con el aporte del calor generado por las personas y los artefactos.

Para conocer el comportamiento térmico de un local es necesario determinar las pérdidas y ganancias de calor que se producirían bajo determinadas condiciones.

Esta tarea se denomina balance térmico, es un método analítico que permite obtener las cargas térmicas del local. Con la determinación de las cargas térmicas se puede estimar la demanda de sistemas artificiales de calefacción o refrigeración de un local ya que nos dan la cantidad de calor que se deberá suministrar o eliminar del ambiente a climatizar, para compensar las pérdidas o ganancias de calor producidas entre el interior y el exterior.

Cuando se habla de pérdidas, nos referimos a pérdidas por ventilación (fugas de aire caliente), pérdida a través de techos y muros, pérdida por el suelo, pérdidas por flujo de aire indeseado (infiltración de aire) por rendijas de puertas y ventanas. Las pérdidas por puertas y ventanas que poseen una resistencia térmica relativamente menores que los muros y techo son por tanto más importantes, dependiendo de su superficie comparativa. Y dentro de las ganancias se presentan en forma de aportaciones por aparatos de calefacción, aparatos que producen calor, aportaciones por el calor emitido por los ocupantes del edificio, ganancias por

conducción a través de muros y techos en verano, y aportaciones solares a través de superficies acristaladas principalmente por su efecto invernadero.

Por las razones antes explicadas, se debe realizar un balance térmico en invierno y otro en verano. La estimación de las cargas térmicas se puede resumir en 4 puntos clave: Condiciones exteriores.

Condiciones interiores.

Pérdidas en invierno.

Ganancias en verano.

- Condiciones exteriores

En este punto se deben reunir las temperaturas (verano-invierno), valores máximos y mínimos correspondientes a valores estadísticos de cada zona en particular. Esta tarea se encuentra resumida en la norma IRAM 11603 (IRAM; 1996) que establece las condiciones climáticas diferenciadas en zonas del todo el país.

- Condiciones interiores

Las condiciones de temperatura y humedad en el interior de un local dependen de varios factores:

- La actividad, a mayor actividad, mayor desprendimiento de calor.

- Temperatura radiante media de los cerramientos

- Velocidad del aire. Debe tener un valor entre 1 m/s y 0,1 m/s para evitar molestias en los habitantes y permitir una renovación constante del aire.

- Ganancias y pérdidas de calor sensible por cerramientos opacos (muros)

Se define al calor sensible como aquel que intercambia un sistema a la vez que modifica su temperatura (Carranza, 1988).

Las transferencias de calor en un muro ocurren por conducción. El régimen estable se suele utilizar en balances para invierno, mientras que en verano se suele considerar el régimen variable debido a la importante influencia de la radiación durante el día en los cerramientos.

Las posibilidades de que el flujo de calor atraviese el muro en mayor o menor medida se calcula de la siguiente manera:

$$Q_0 = K * S * \Delta T \quad (18)$$

- Ganancias y pérdidas de calor sensible por cerramientos translúcidos (vidrios)

En este caso ocurren transferencias de calor por medio de dos fenómenos: 1- Conducción, del mismo modo que ocurre en los muros- 2- Radiación.

En el caso de la conducción, tendremos tanto ganancias como pérdidas, y su determinación se realiza de la misma forma que con los cerramientos opacos, con la fórmula 14. La radiación sólo produce ganancias. El flujo de calor ganado producido por la radiación se puede analizar bajo la siguiente ecuación

$$Q_t = RS * S * f_r \quad (19)$$

Donde: Q_t = flujo de calor a través del cerramiento traslúcido (Kcal/h)

RS=coeficiente de radiación solar incidente en los cerramientos (Kcal/h m²)

S=superficie expuesta a los rayos solares (m²)

f_r = factor de reducción

El valor de RS resulta difícil de calcular, ya que depende de la posición relativa del sol con respecto al cerramiento en cuestión, y esta posición está relacionada con su orientación, con la latitud del lugar y la hora del día. Los valores de f_r representan la existencia de elementos que impiden o limitan la incidencia de los rayos solares y han sido determinados empíricamente según el caso que se trate.

• Cargas de calor latente

Se define el calor latente como: aquel que intercambia el sistema mientras su temperatura permanece constante. Este último efecto calorífico se da genéricamente en los cambios de fase y en las reacciones químicas (Carranza, 1988).

Este análisis es importante en verano donde el contenido de humedad tiende a ser mayor del recomendable o deseable, debido a varias razones, entre las más importantes: las personas, artefactos electrónicos y el aire exterior que normalmente contiene altos contenidos de humedad. Entonces, resulta necesario secar el aire y para ello es necesario disminuir su contenido de humedad, esto sólo se consigue mediante el enfriamiento del aire por debajo del punto de rocío del mismo, ya que a partir de ese punto se produce la condensación del vapor de agua contenido en su masa. Esta cantidad de calor se conoce como el calor latente, el cual no modifica la temperatura, pero sí el estado del vapor del aire.

• Ganancias de calor sensible y latente por cargas internas

Las cargas o aporte del calor en el interior de un local se pueden deber a las personas habitantes, los artefactos del lugar y la iluminación. Los primeros dos casos generan aumentos de calor latente y sensible. Mientras que la iluminación genera solamente aumento en la temperatura.

Las personas debido a su metabolismo producen calor como residuo, el cual será mayor cuanto más intensa sea la actividad física que estén realizando. Este calor generado, deberá disiparse en el medio utilizando para ello el cuerpo humano, los mecanismos de conducción, convección y radiación, lo que significa un aporte de calor sensible. Otro mecanismo para equilibrar el cuerpo es el proceso de transpiración, con el cual aporta vapor de agua al medio, generando un aporte de calor latente.

La iluminación artificial, como toda energía genera calor, provocando un aporte de calor sensible en el medio independientemente del tipo de fuente de luz utilizada.

En lo referido a los artefactos, dependen de una fuente externa de energía para funcionar (electricidad, gas, vapor, etc.), de modo que, si conocemos la cantidad de energía consumida, podremos saber cuánto calor sensible estarán aportando al local. Y, por otro lado, algunos artefactos, el resultado de su funcionamiento puede llevar a un aporte de vapor de agua (cafeteras, ollas, secadores de cabello, etc.) al ambiente, generando una fuente de calor latente.

- Ganancias y pérdidas de calor sensible y latente debido al ingreso de aire exterior.

El aire exterior que se infiltra a través de las hendiduras de los cerramientos móviles, o que penetra voluntariamente a través de las aberturas y tomas especiales resulta una carga térmica para el equipo de calefacción o refrigeración, ya que el aire ingresa con la temperatura y humedad exterior y se debe acondicionar a las características interiores del ambiente. Por ello se debe realizar una estimación de la cantidad de aire a tratar.

El aire ingresante se puede dividir en dos tipos:

- 1- Aire exterior de infiltración.
- 2- Aire exterior de renovación higiénica.

El aire exterior de infiltración se estima con la ecuación

$$Q_{ai} = L * C_a \quad (20)$$

Donde: Q_{ai} = caudal de aire de infiltración por las aberturas (m^3/h)

L = longitud total de aberturas en metros lineales (m)

C_a = coeficiente de aberturas (m^3/mh).

El C_a representa la cantidad de aire que entra por abertura, se encuentran tabulados según el tipo de abertura que se trate.

El aire de renovación se determina como:

$$Q_{ar} = Np * Cr \quad (21)$$

Donde: Q_{ar} = caudal de aire de renovación higiénica (m³/h)

Np = número de personas que ocupan el local

Cr = coeficiente de renovación de aire por persona (m³/persona).

Esta cantidad de aire para renovación suele ser muy superior al aire que ingresa por aberturas, de modo que generalmente para cubrir los mínimos necesarios, se debe recurrir a una Toma de Aire Exterior (TAE) que estará dimensionada para:

$$Q_{TAE} = Q_{ar} - Q_{ai} \quad (22)$$

Donde: Q_{TAE} = caudal para dimensionado de las bocas de toma de aire (m³/h).

Una vez obtenidos los caudales de aire se deben estimar los ingresos de calor sensible y latente que producen en función de coeficientes de calor volumétricos y diferencias de temperaturas.

- Factor de calor sensible

En verano, es necesario enfriar el aire que se ingresa a un local para acondicionarlo, y quitarle humedad, hasta llegar a los parámetros establecidos previamente de temperatura y humedad relativa. De modo que el aire que se insufla al interior del ambiente deberá estar más frío y más seco que el aire existente en ese local. Por ello es necesario conocer exactamente las proporciones de calor sensible y calor latente que componen este calor total. Esto se evalúa en un coeficiente adimensional denominado factor de calor sensible. Este factor se utiliza en el diseño de conductos de aire para sistemas de refrigeración.

$$FCS = \frac{Q_{cs}}{Q_t} \quad (23)$$

Dónde: FCS= Factor de calor sensible

Q_{cs} = cantidad de calor sensible total del local (Kcal/h)

Q_t = cantidad de calor total en el local (Kcal/h).

4.5.1. Materiales y métodos

El clima en el que se encuentra el edificio es clave para proyectar el diseño del mismo. La norma IRAM 11603 (IRAM; 1996): “Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina” establece una zonificación de nuestro país en zona bioambientales, esta clasificación se realiza teniendo en cuenta los índices de confort de la Temperatura Efectiva Corregida

(TEC) y otros indicadores para las zonas cálidas, para el caso de las zonas frías se clasifican en función de los Grados-Días para las necesidades de calefacción.

Para cada una de ellas, se dan pautas generales para el diseño, la evaluación de las orientaciones favorables y el cumplimiento del asoleamiento mínimo de los edificios destinados a vivienda.

Se definieron seis zonas de acuerdo con los índices de confort de la TEC y el parámetro de Grados-días. En la Figura 14 se indica la clasificación.

- Zona I: Muy cálida

Comprende la región donde los valores de TEC media, en el día típicamente cálido, son mayores que 26,3 °C. Se tienen 2 subdivisiones:

Subzona Ia: amplitudes térmicas mayores que 14°C

Subzona Ib: amplitudes térmicas menores que 14 ° C

- Zona II: Cálida

Limitada entre las isólineas de TEC 26,3 °C y 24,6 °C. También tiene 2 subdivisiones:

Subzona IIa: amplitudes térmicas mayores que 14°C

Subzona IIb: amplitudes térmicas menores que 14°C

- Zona III: Templada Cálida

Limitada por las isólineas de TEC 24,6 °C y 22,9 °C. Con dos subdivisiones:

Subzona IIIa: amplitudes térmicas mayores que 14°C

Subzona IIIb: amplitudes térmicas menores que 14°C

- Zona IV: Templada Fría

Esta zona tiene como límite superior la isólinea de 1170 grados-días (coincidente con la isólinea de 22,9 °C de TEC), y como límite inferior la isólinea de 1 950 grados días. Esta zona se subdivide en cuatro subzonas mediante las líneas de amplitud térmica de 14 °C y 18 °C:

Subzona IVa: de montaña.

Subzona IVb: de máxima irradiancia.

Subzona IVc: de transición.

Subzona IVd: marítima.

- Zona V: Fría

Limitada entre las isólineas de 1950 grados días y 2730 grados-días.

- Zona VI: Muy Fría

Ubicada en la región donde los valores en grados-días son mayores que 2730.

La provincia de Córdoba se encuentra en la zona IIIa: Templada cálida con amplitudes térmicas mayores que 14°C.

La norma IRAM 11.605 (IRAM; 2001): “Acondicionamiento térmico de edificios.

Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos admisibles de transmitancia térmica en cerramientos opacos”, indica la transmitancia térmica máxima admisible para invierno y verano, con tres niveles de calidad:

- A: Óptimo
- B: Normal
- C: Mínima

La Secretaría de Vivienda exige el cumplimiento de Nivel C para vivienda de interés social. La versión anterior de la norma (IRAM; 1996) permitía mayor transmitancia térmica en paredes con mayor capacidad térmica considerando su peso superficial en kilogramos por metro cuadrado. Sin embargo, a fin de simplificar la verificación de cumplimiento, la norma actual sólo considera la transmitancia térmica como indicador del comportamiento térmico de un elemento constructivo.

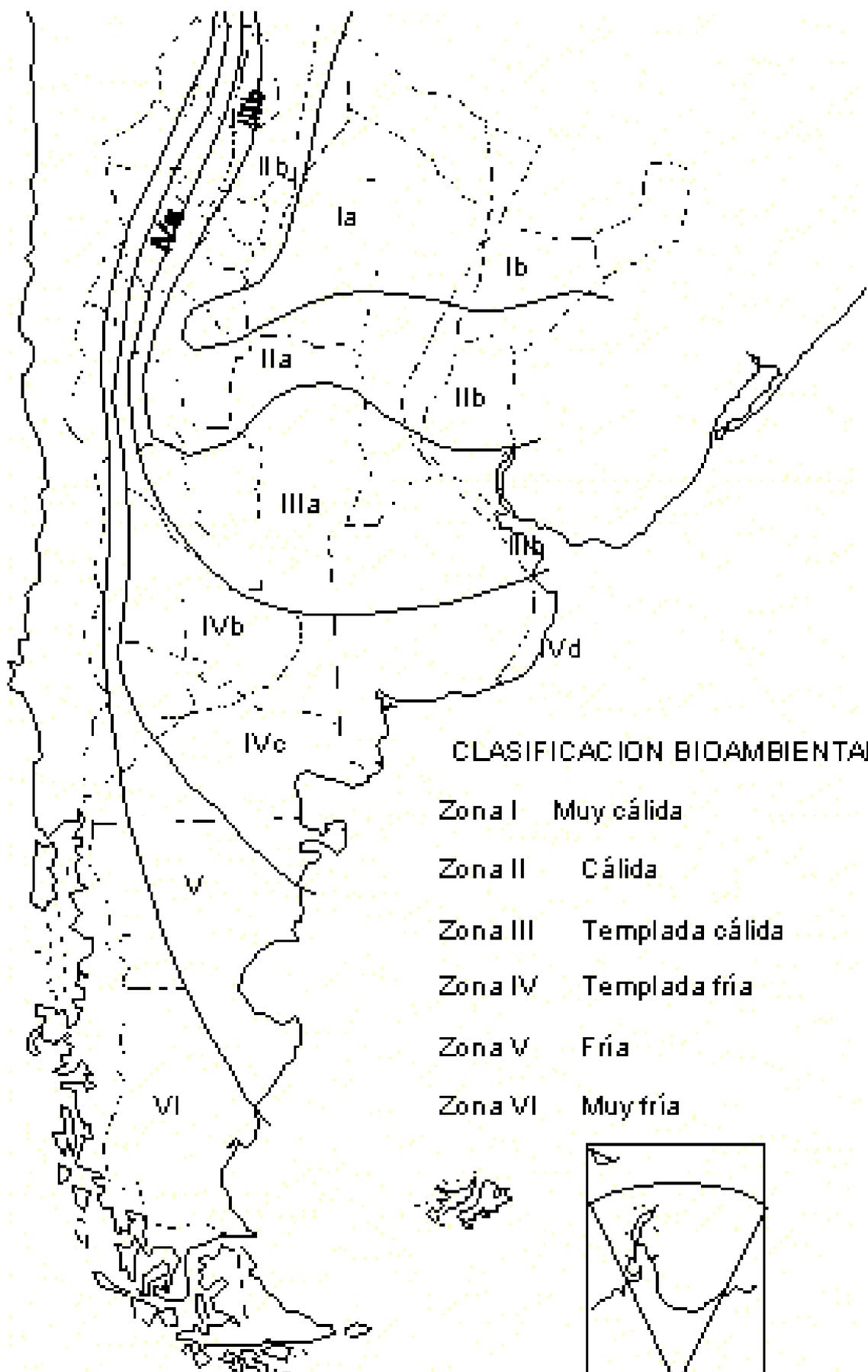


Figura 14: clasificación bio-ambiental. IRAM 11603

En las Tabla 2 y Tabla 3 se indican los valores máximos para muros en función del nivel de calidad elegido.

Tabla 2: Valores máximos admisibles de K para condición de invierno en muros (Norma IRAM 11605).

en W/m^2K

Temperatura exterior de diseño (t_{ed}) [°C]	Nivel A		Nivel B		Nivel C	
	Muros	Techos	Muros	Techos	Muros	Techos
- 15	0,23	0,20	0,60	0,52	1,01	1,00
- 14	0,23	0,20	0,61	0,53	1,04	1,00
- 13	0,24	0,21	0,63	0,55	1,08	1,00
- 12	0,25	0,21	0,65	0,56	1,11	1,00
- 11	0,25	0,22	0,67	0,58	1,15	1,00
- 10	0,26	0,23	0,69	0,60	1,19	1,00
- 9	0,27	0,23	0,72	0,61	1,23	1,00
- 8	0,28	0,24	0,74	0,63	1,28	1,00
- 7	0,29	0,25	0,77	0,65	1,33	1,00
- 6	0,30	0,26	0,80	0,67	1,39	1,00
- 5	0,31	0,27	0,83	0,69	1,45	1,00
- 4	0,32	0,28	0,87	0,72	1,52	1,00
- 3	0,33	0,29	0,91	0,74	1,59	1,00
- 2	0,35	0,30	0,95	0,77	1,67	1,00
- 1	0,36	0,31	0,99	0,80	1,75	1,00
≥ 0	0,38	0,32	1,00	0,83	1,85	1,00

* Para valores de t_{ed} intermedios, los valores de $K_{MAX ADM}$ se obtienen por interpolación lineal.

Tabla 3: Valores máximos admisibles de K para condición de verano en muros (Norma IRAM 11605).

en $W/m^2.K$

Zona Bioambiental	Nivel A	Nivel B	Nivel C
I y II	0,45	1,10	1,80
III y IV	0,50	1,25	2,00

Además de las normas, se utilizó el software BT6 de Dilasoft para realizar el balance térmico del edificio en estudio. La versión utilizada fue un demo gratuito de prueba por 60 días. El programa permite la realización de cálculos térmicos para calefacción y aire acondicionado en locales, casas, comercios y edificios de hasta 50 ambientes. Utiliza el método de cálculo según las funciones de transferencia de calor.

Posee una base de datos abierta con datos de ciudades, coeficientes de transmisión de cargas varias, materiales, paredes, pisos, techos y vidrios.

Permite el cálculo de nuevos coeficientes de transmisión para paredes, pisos y techos, utilizando los materiales contenidos en la base de datos, como también el ingreso de K especiales.

Los datos que se deben ingresar para realizar el balance térmico son:

- Vidrios: superficie, tipo de protección, material y orientación
- Paredes interiores: superficie y material
- Paredes exteriores: superficie, material y orientación
- Pisos y techos: superficie y material
- Personas, actividad, luces y cargas.

Es importante destacar que el programa trabaja por el *Método de Función de Transferencia de ASHRAE* y las bases de datos utilizan los valores extraídos de las normas IRAM 11601y de ASHRAE 2005 HVAC Fundamentals Handbook.

En la Figura 15 se muestran las distintas pestañas del programa.

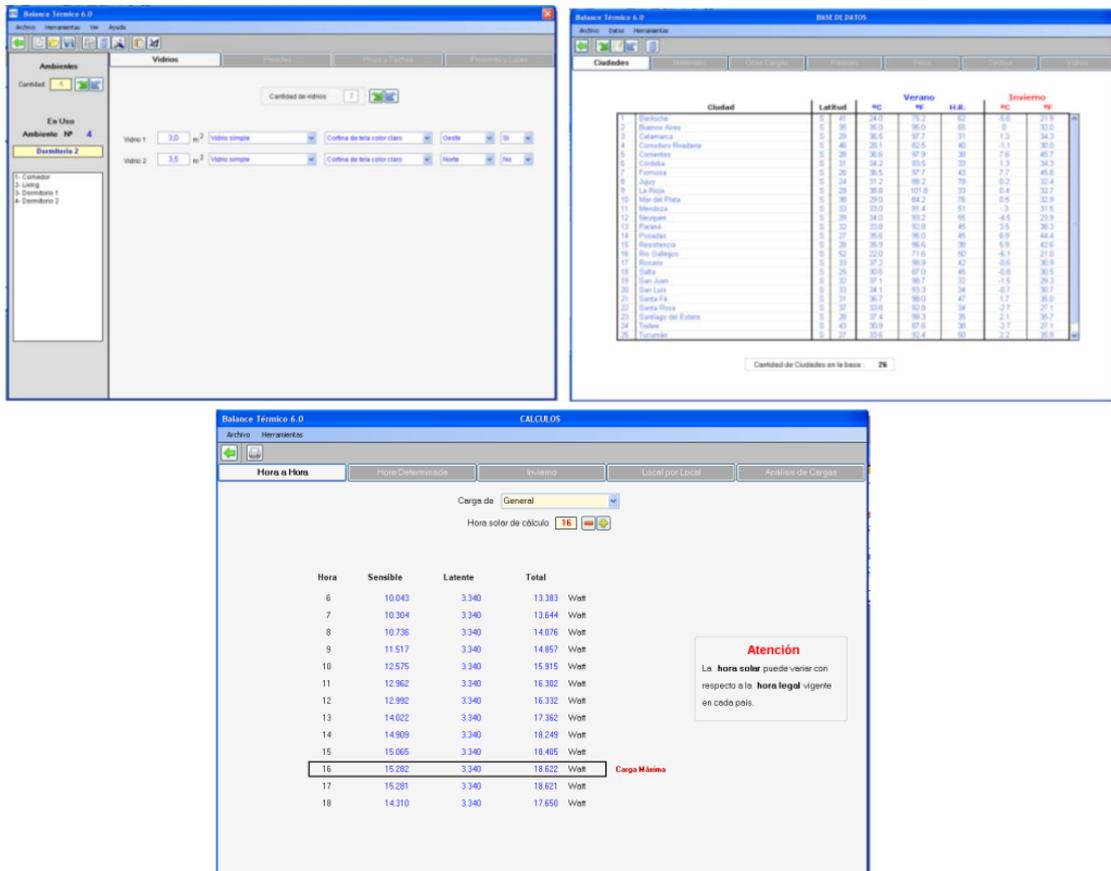


Figura 15: Pestañas de datos del programa BT6 de Dilasoft.

4.5.2. Determinación del K de los materiales

Para que exista transmisión de calor, debe existir un diferencial de temperatura entre las dos caras del elemento en cuestión. Las tres formas de transmisión de

calor son conducción, convección y radiación. Cuanto mayor es el diferencial de temperatura, mayor es el flujo de calor.

Es posible determinar tres propiedades básicas para la definición de las características térmicas de un material: Conductividad térmica (λ), Calor Específico (C_p) y Densidad (ρ). A partir de las mismas se pueden calcular como lo son las Resistencia Térmica (R), Transmitancia Térmica (K) y Capacidad Térmica (C_t) (Cabezas, 2012).

La Resistencia térmica de un material representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor. En el caso de materiales homogéneos es la razón entre el espesor y la conductividad térmica del material:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (24)$$

Resistencia térmica del material ($m^2 \text{ }^\circ\text{C}/ W$); e : espesor del material (m); λ : conductividad térmica del material ($W /m^2 \text{ }^\circ\text{C}$).

La Transmitancia Térmica es la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, transferido a través de un sistema constructivo, cuando hay un gradiente térmico de 1°C de temperatura entre los dos ambientes que éste separa.

Se emplea para expresar la capacidad aislante de un elemento constructivo particular formado por una o más capas de materiales. Desde un punto de vista físico es la cantidad de energía que fluye, en la unidad de tiempo, a través de una unidad de superficie del elemento, cuando hay un gradiente térmico unidad. Es el inverso a la resistencia térmica.

$$K = \frac{1}{R_i} = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (25)$$

K_i = transmitancia térmica del material ($W/m^2 \text{ }^\circ\text{C}$)

A la hora de determinar la eficiencia energética de una edificación se utiliza el coeficiente K , entre otros parámetros, dado que su valor incluye la resistencia térmica de ambas caras del sistema, cuanto menor sea el valor de K , menor será el traspaso de energía entre ambas caras, y por tanto mejor las capacidades aislantes del elemento.

K tiene valores máximos, los cuales se encuentran reglamentados por normas IRAM.

La norma IRAM 11601 (IRAM; 2004): “Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo” establece los valores y métodos fundamentales para el cálculo de las propiedades térmica de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Determina el cálculo del coeficiente de transmitancia térmica para muros, entre otros elementos, partiendo de la ecuación antes mencionada.

La resistencia total está dada por la suma representada mediante la ecuación

$$R_t = R_{si} + R_t + R_c + R_{se} \quad (26)$$

Dónde: R_{si} = resistencia térmica interna superficial

R_t = resistencia térmica de los componentes estructurales

R_c = resistencia térmica de las cámaras de aire

R_{se} = resistencia térmica externa superficial.

Las resistencias R_{si} y R_{se} se encuentran tabuladas en la norma en función de la dirección del flujo. Para muros sus valores son; $R_{si} = 0,13$ y $R_{se} = 0,04$.

Las resistencias R_c se encuentran descriptas en la normativa en función del espesor de la cámara de aire.

Con las consideraciones mencionadas anteriormente, obtenemos la transmitancia de los cerramientos del edificio en las Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6. En la Tabla 7 se presenta un resumen de las transmitancia.

Tabla 4: Cálculo de resistencia térmica de Muro Interior

Especificación	Espes. (m)	Conduc. W/m°C	R.Ca.ve m²°C/W	R.Ca.in m²°C/W	Peso Es. (Kg/m³)	Cap.Tér. J/Kg°C	R.T.ver m²°C/W
R.se							0,040
durlock	0,0125	0,38			800	1000	0,033
lana de vidrio	0,0500	0,042			65	750	1,190
CAMARA DE AIRE	0,3450		0,170	0,170			0,170
durlock	0,0125	0,25			1000	1000	0,050
R.si							0,130
ESPESOR TOTAL	0,420					RES.TERM. TOT.	1,613

$$K = 0.62 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

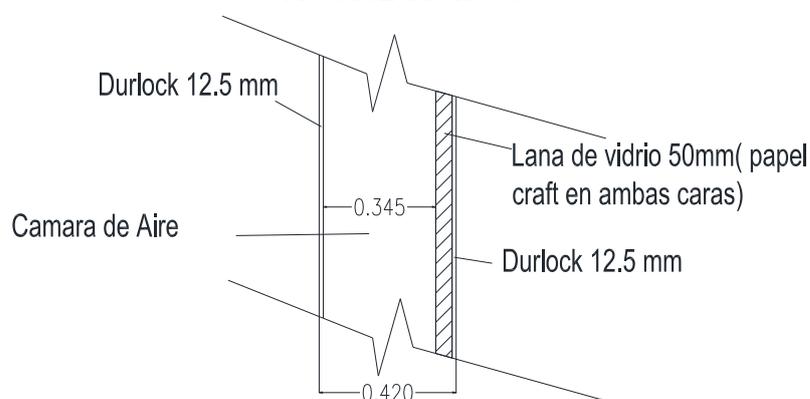


Figura 16: Detalle constructivo cerramiento interior

Tabla 5 : Cálculo de Resistencia térmica Muro Exterior.

Especificación	Espes.	Conduc.	R.Ca.ve	R.Ca.in	Peso Es.	Cap.Tér.	R.T.ver
	(m)	W/m°C	m ² °C/W	m ² °C/W	(Kg/m ³)	J/Kg°C	m ² °C/W
R.se							0,040
chapa	0,0055	58,000			7800	450	0,000
camara de aire	0,3450		0,170	0,170			0,170
lana de vidrio	0,0500	0,042			65	750	1,190
durlock	0,0125	0,25			788	1000	0,050
R.si							0,130
ESPESOR TOTAL	0,413				RES.TERM. TOT.		1,581

$$K = 0.63 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

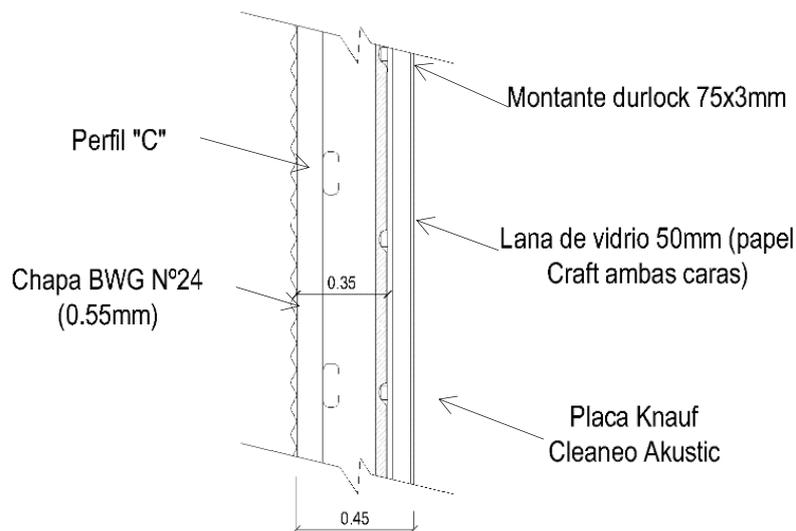


Figura 17: Detalle constructivo cerramiento exterior

Tabla 6: Cálculo de Resistencia térmica Cubierta Superior.

Especificación	Espes.	Conduc.	R.Ca.ve	R.Ca.in	Peso Es.	Cap.Tér.	R.T.ver
	(m)	W/m°C	m ² °C/W	m ² °C/W	(Kg/m ³)	J/Kg°C	m ² °C/W
R.se							0,040
lana de vidrio	0,0500	0,042			65	750	1,190
durlock	0,0125	0,37			800	1000	0,034
Barrera de aire	0,7000		0,170	0,170			0,170
R.si x2							0,340
ESPESOR TOTAL	0,763				RES.TERM. TOT.		1,734

$$K = 0.58 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

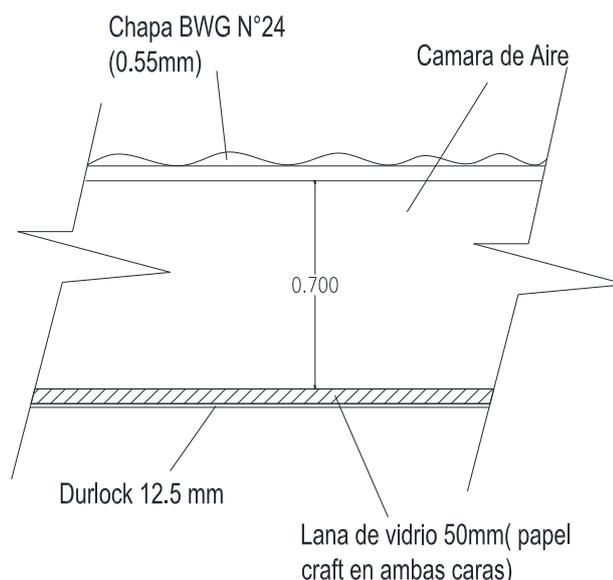


Figura 18: Detalle constructivo de cubierta

Tabla 7: Resumen de transmitancia.

ELEMENTO	K (W/m ² °C)	K máx. Recomendado INVIERNO (W/m ² °C)	K máx. Recomendado VERANO (W/m ² °C)	IRAM 11.605
Muro Interior	0,62	0,91	1,25	VERIFICA
Muro Exterior	0,63	0,91	1,25	VERIFICA
Cubierta	0,58	0,91	1,25	VERIFICA

4.5.3. Resultados del balance térmico

Las condiciones de comodidad para los usuarios dependerán de varios factores entre los que se incluyen el tipo de actividad y la vestimenta, teniendo en cuenta que es un salón de usos múltiples y permite las actividades de alumnos, docentes y público en general en horas alternativas. Las temperaturas de diseño determinadas por la norma son para invierno temperatura mínima de diseño de 13°C y para verano la máxima de diseño es de 34.2°C. El salón de usos múltiples tiene un volumen de 602m³.

De acuerdo a lo recomendado por la norma IRAM 11605, se han establecido tres niveles de confort higrotérmico y los valores máximos admitidos de transmitancia térmica para verano e invierno respectivamente (Tabla 8).

Tabla 8: Transmitancia térmica máxima para los distintos niveles de confort higrométrico considerados (verano-invierno).

Zona Bioambiental	Nivel A (W/m ² K)	Nivel B (W/m ² K)	Nivel C (W/m ² K)
I y II	0.45	1.10	1.80
III y IV	0.50	1.25	2.00

Temperatura exterior de diseño (°C)	Nivel A (W/m ² K)		Nivel B (W/m ² K)		Nivel C (W/m ² K)	
	Muro	Techo	Muro	Techo	Muro	Techo
≥0	0.38	0.32	1.00	0.33	1.85	1.00

Los parámetros utilizados en el programa BT6 (Dilasoft) para realizar el balance térmico fueron:

Tabla 9: Datos del balance utilizados en el programa BT6

DATOS DEL BALANCE			
VERANO		INVIERNO	
Temperatura exterior	34,2°C	Temperatura exterior	1,3°C
Temperatura interior	20°C	Temperatura interior	25°C
Humedad relativa exterior		33%	
Humedad relativa interior		50%	

Tabla 10: Propiedades térmicas utilizados en programa BT6

Propiedades térmicas de los materiales	
Vidrios	5,82 W/m ² K
Paredes exteriores	0,63 W/m ² K
Paredes interiores	0,62 W/m ² K
Cubierta	0,64 W/m ² K
Piso	0,45 W/m ² K

Tabla 11: parámetros utilizados en el programa BT6.

Cantidad de Personas	70		
Luces	5400W		
Infiltraciones	Nulas		
Otras Cargas	Nulas		
Factor de Simultaneidad	2	Ocupación 95%	Luces 85%

A partir del balance térmico realizado con el programa Dilasoft considerando la temperatura y humedad recomendada en la norma IRAM 11603, se determinó:

Tabla 12: Resultados de Balance térmico del lugar de estudio.

En Verano	37592 Frigorías/hora
En Invierno	27824 Kcal/hora

Es decir que para poder lograr la temperatura de confort es necesario adicionar fuentes de calor en invierno y de refrigeración en verano consumiendo una cantidad de energía.

En base a los resultados obtenidos, se busca como objetivo utilizar el método de tubos canadienses para lograr una disminución en el consumo de energía, ya que se logra una disminución de la temperatura al aplicar el método.

CAPÍTULO 5: APLICACIÓN DE GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA AL CASO DE ESTUDIO

5.1. Cálculo

Para poder aplicar el método de diseño del sistema de intercambiador de calor tierra-aire, es preciso conocer determinadas propiedades tanto del suelo como del material de los tubos y del aire a la temperatura considerada (Tabla 13 y Tabla 14).

Tabla 13: Parámetros a considerar.

PARAMETROS				
		AIRE	SUELO	TUBO
Conductividad térmica (λ)	W/Km	0,025	0,80	0,16
Densidad (ρ)	Kg/m ³	1,1458		
Capacidad térmica	J/KgK	1007		
Viscosidad dinámica (μ)		0,00001875		
Viscosidad cinemática (ν)	m ² /s	1,6364E-05		
Difusividad térmica (α)		0,00002167		

Tabla 14: Temperaturas de diseño. (IRAM, 1996)

Temperatura	°C
Tair,in (verano)	34,2
Tair,in (invierno)	1,3
Tsuelo(verano)	17
Tsuelo(invierno)	18
Tdiseño (verano)	25
Tdiseño (invierno)	20

Se aplicó el método de cálculo de NTU, asumiendo una configuración del tipo Directos Aislados la cual es construida con tubos de PVC de diámetro exterior de 0,22 m, longitudes variables, un extractor de aire con una velocidad de 5m/s. Se asume una temperatura del suelo de 17°C en verano y 18°C en invierno, la temperatura de ingreso de aire es variable y depende de la estación que se esté considerando.

Los resultados se presentan en la Tabla 15 y Tabla 16.

Φ_e : Radio exterior del tubo.

L: Longitud del tubo.

A: Área transversal del tubo.

V: Velocidad del aire.

Q: caudal del aire.

Tabla 15: Resultado de la aplicación del método de cálculo de diseño para las condiciones de verano.

ϕ_e (m)	L (m)	Área (m ²)	V(m/s)	Q (m ³ /s)	Tair,in (°C)	Tsuelo (°C)	Tair,out (°C)
0,2200	5	0,038	5,00	0,190	34	17,0	33,6
0,2200	10	0,038	5,00	0,190	33	17,0	32,0
0,2200	20	0,038	5,00	0,190	32	17,0	30,2
0,2200	30	0,038	5,00	0,190	31	17,0	28,5
0,2200	40	0,038	5,00	0,190	30	17,0	27,0
0,2200	50	0,038	5,00	0,190	29	17,0	25,7
0,2200	60	0,038	5,00	0,190	28	17,0	24,4
0,2200	70	0,038	5,00	0,190	27	17,0	23,3
0,2200	90	0,038	5,00	0,190	26	17,0	22,0
0,2200	100	0,038	5,00	0,190	25	17,0	21,2
0,2200	110	0,038	5,00	0,190	24	17,0	20,4
0,2200	120	0,038	5,00	0,190	23	17,0	19,7
0,2200	130	0,038	5,00	0,190	22	17,0	19,1
0,2200	140	0,038	5,00	0,190	21	17,0	18,6
0,2200	150	0,038	5,00	0,190	20	17,0	18,1

Tabla 16: Resultado de la aplicación del método de cálculo de diseño para las condiciones de invierno.

ϕ_e (m)	L (m)	Área (m ²)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	Tair,in (°C)	Tsuelo (°C)	Tair,out (°C)
0,22	5	0,04	5	0,19	1	18	1,50
0,22	10	0,04	5	0,19	2	18	2,93
0,22	20	0,04	5	0,19	3	18	4,69
0,22	30	0,04	5	0,19	4	18	6,29
0,22	40	0,04	5	0,19	5	18	7,76
0,22	50	0,04	5	0,19	6	18	9,09
0,22	60	0,04	5	0,19	7	18	10,31
0,22	70	0,04	5	0,19	8	18	11,41
0,22	80	0,04	5	0,19	9	18	12,41
0,22	90	0,04	5	0,19	10	18	13,32
0,22	100	0,04	5	0,19	11	18	14,14
0,22	110	0,04	5	0,19	12	18	14,88
0,22	120	0,04	5	0,19	13	18	15,55
0,22	130	0,04	5	0,19	14	18	16,16
0,22	140	0,04	5	0,19	15	18	16,70

En base a los resultados que se obtuvieron, se puede observar en la Figura 19, como varía la eficiencia, con la temperatura del aire a la salida del tubo, se puede apreciar que la misma es una parábola, ya que se grafica una función exponencial, y además se puede notar que la misma se hace asíntota al eje horizontal.

Tabla 17: Resultado de la aplicación del método considerando como varía la Eficiencia.

ϕ_e (m)	L (m)	Área (m ²)	V (m/s)	\dot{m}_{air} (kg/seg)	UA (W/K)	ϵ (adim)	T _{air,in} (°C)	T _{suelo} (°C)	T _{air,out} (°C)
0,22	5	0,04	5	0,22	7,17	0,03	30,7	17	30,3
0,22	10	0,04	5	0,22	14,35	0,06	30,7	17	29,8
0,22	20	0,04	5	0,22	28,70	0,12	30,7	17	29,0
0,22	30	0,04	5	0,22	43,05	0,18	30,7	17	28,3
0,22	40	0,04	5	0,22	57,40	0,23	30,7	17	27,6
0,22	50	0,04	5	0,22	71,75	0,28	30,7	17	26,9
0,22	60	0,04	5	0,22	86,10	0,32	30,7	17	26,3
0,22	70	0,04	5	0,22	100,45	0,37	30,7	17	25,7
0,22	80	0,04	5	0,22	114,80	0,41	30,7	17	25,1
0,22	90	0,04	5	0,22	129,15	0,44	30,7	17	24,6
0,22	100	0,04	5	0,22	143,50	0,48	30,7	17	24,1
0,22	110	0,04	5	0,22	157,85	0,51	30,7	17	23,7
0,22	120	0,04	5	0,22	172,20	0,54	30,7	17	23,3
0,22	130	0,04	5	0,22	186,55	0,57	30,7	17	22,9
0,22	140	0,04	5	0,22	200,90	0,60	30,7	17	22,5
0,22	150	0,04	5	0,22	215,25	0,62	30,7	17	22,1

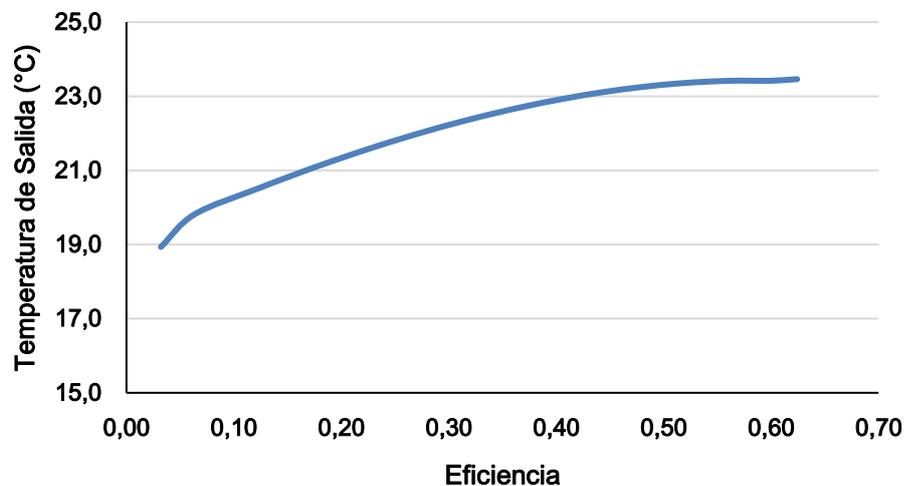


Figura 19: Gráfico de Temperatura vs. Efectividad.

Si consideramos la variación de la longitud del tubo y mantenemos constante la temperatura del aire a la entrada del tubo, asumiendo una temperatura igual a la media tanto en verano como en invierno. Los resultados se muestran en las Tabla 18 y Tabla 19.

Tabla 18: Resultados de la aplicación del método con temperatura de ingreso constante en condiciones de verano.

ϕ_e (m)	L (m)	Área (m ²)	V(m/s)	Q (m3/s)	Tair,in (°C)	Tsuelo (°C)	Tair,out (°C)
0,2200	5	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	30,3
0,2200	10	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	29,8
0,2200	20	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	29,0
0,2200	30	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	28,3
0,2200	40	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	27,6
0,2200	50	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	26,9
0,2200	60	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	26,3
0,2200	70	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	25,7
0,2200	90	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	25,1
0,2200	100	0,038	5,00	0,190	30,7	17,0	24,6

Tabla 19: Resultados de la aplicación del método considerando temperatura de ingreso constante en condiciones de invierno.

ϕ_e (m)	L (m)	Área (m ²)	V (m/s)	Q (m3/s)	Tair,in (°C)	Tsuelo (°C)	Tair,out (°C)
0,22	5	0,04	5	0,19	5,8	18	6,16
0,22	10	0,04	5	0,19	5,8	18	6,51
0,22	20	0,04	5	0,19	5,8	18	7,17
0,22	30	0,04	5	0,19	5,8	18	7,80
0,22	40	0,04	5	0,19	5,8	18	8,39
0,22	50	0,04	5	0,19	5,8	18	8,94
0,22	60	0,04	5	0,19	5,8	18	9,47
0,22	70	0,04	5	0,19	5,8	18	9,96
0,22	80	0,04	5	0,19	5,8	18	10,43
0,22	90	0,04	5	0,19	5,8	18	10,86
0,22	100	0,04	5	0,19	5,8	18	11,28

A su vez, si se realiza una gráfica, donde se consideran distintos tipos de suelo, con el mismo caudal de aire, se podrá observar como varía la longitud en función de la temperatura del aire a la salida del tubo. (Figura 21 y Figura 22)

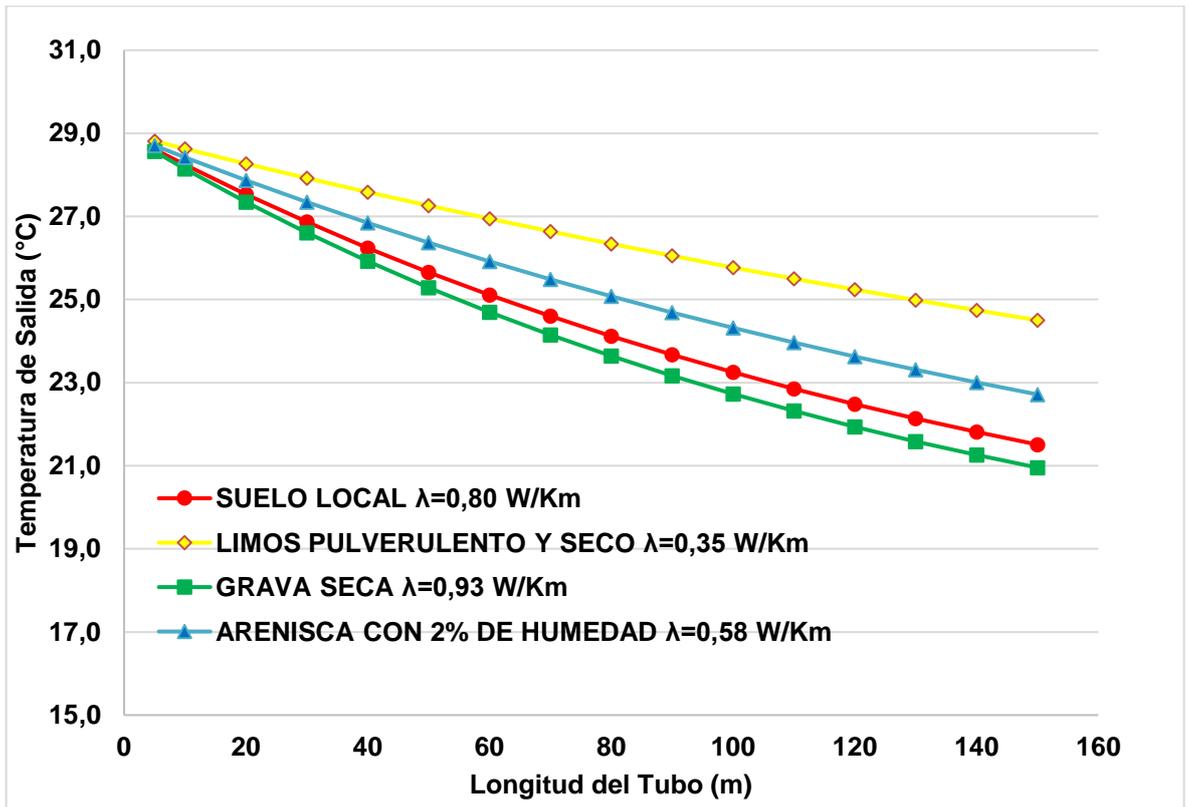


Figura 20: Temperatura vs. Longitud del Tubo en condiciones de verano.

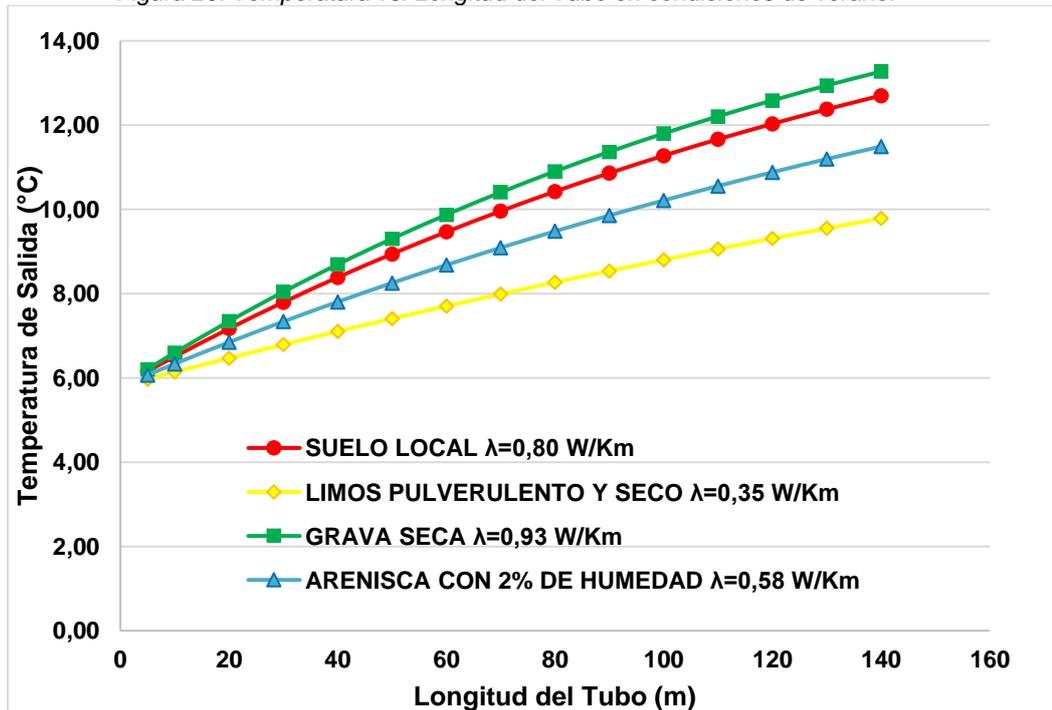


Figura 21: Temperatura vs. Longitud del Tubo en condiciones de invierno.

Si se considera que la temperatura en el exterior es variable y no se encuentra durante todo el día en el valor máximo, en consecuencia se adopta una temperatura de ingreso al tubo de 30,7°C (temperatura media máxima, para verano) y 5,8°C (en

invierno), considerándolas como las más desfavorables (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Es importante destacar, que la temperatura durante el día es fluctuante, por ello los valores obtenidos pueden variar y obtenerse una mayor diferencia de temperaturas entre el aire que ingresa y el que sale.

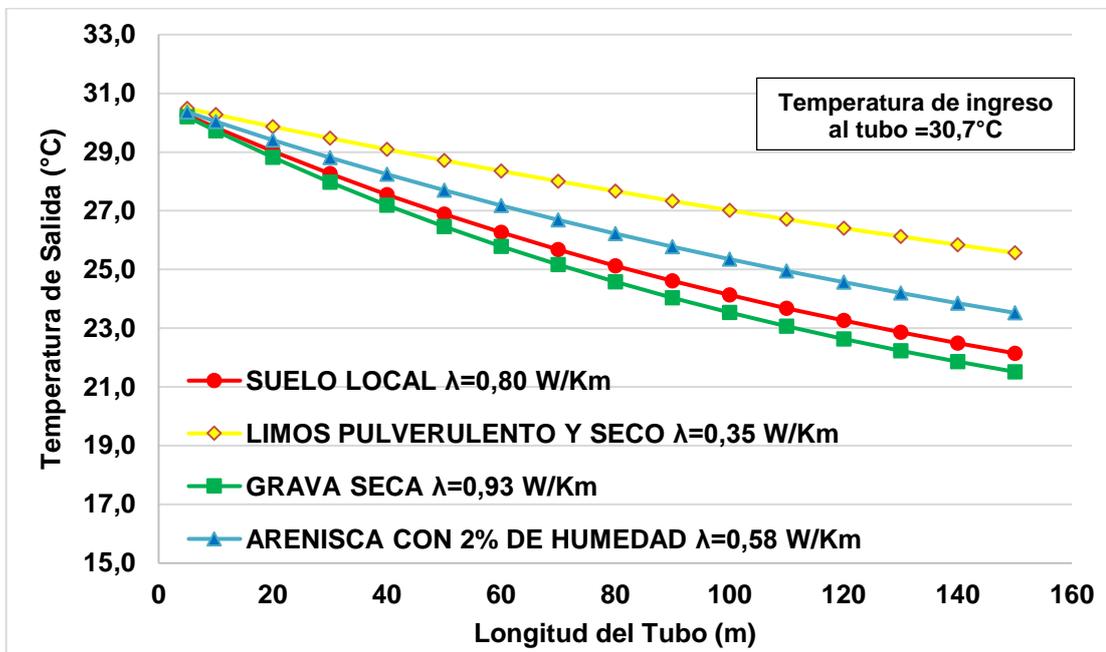


Figura 22: Temperatura vs. Longitud del Tubo en condiciones de verano (temperatura de ingreso constante)

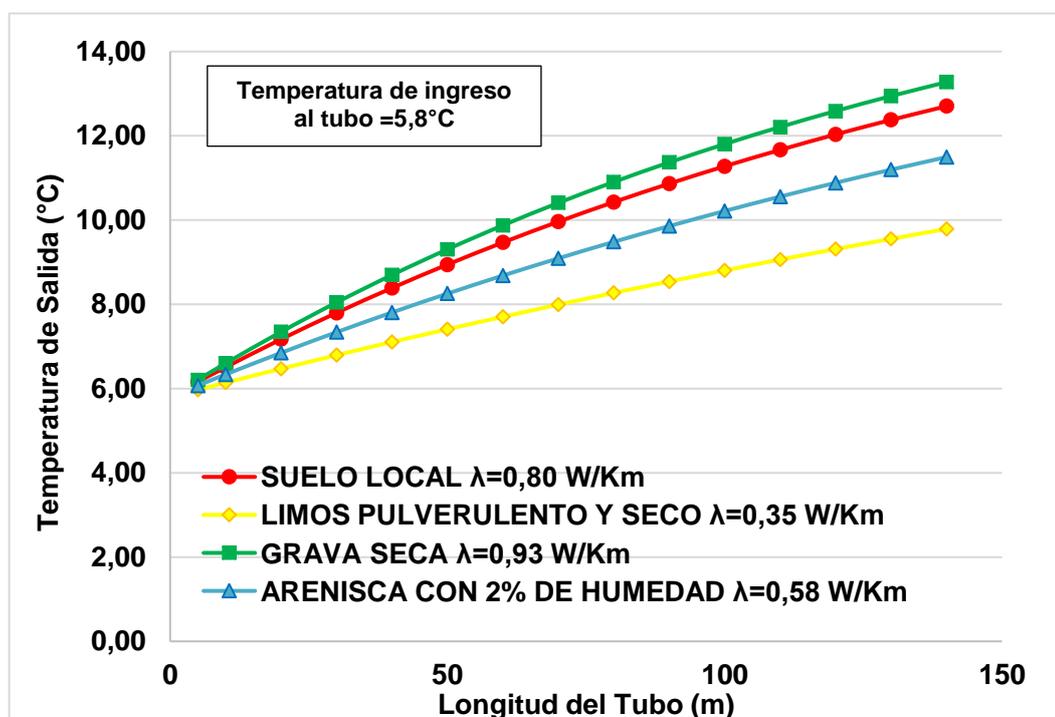


Figura 23: Temperatura vs. Longitud del Tubo en condiciones de invierno (temperatura de ingreso constante)

Las conductividades térmicas de los suelos para realizar los cálculos necesarios, se extrajeron de la Tabla 20:

Tabla 20: Transmitancia térmica máxima para los distintos niveles de confort higrométrico considerados (verano-invierno).

Material	Densidad Aparente (gr/m ³)	Conductividad Térmica λ (W/mK)
Limo pulverulento y seco	0,90	0,35
Grava Seca	1,50	0,93
Suelo natural (depende de la composición, grado de compactación y humedad)	1,60 a 1,90	0,28 a 2,8
Arenisca 2% de humedad	1,30 a 1,50	0,58

Fuente: Caracterización geotécnica de Ecomuros con suelo-cemento en Córdoba, 2012

Para la conductividad del suelo local, se utilizó 0.80 W/mK (Narsilio et al., 2015).

En ambos gráficos, se puede observar, que para lograr más eficiencia, se necesita una longitud mayor considerando siempre la misma velocidad, esto se debe a que al estar el aire más tiempo en contacto con el tubo, que se encuentra a la misma temperatura del suelo, se genera un intercambio de calor mejor.

A mayor longitud de conducto existe mayor transferencia de calor y el rendimiento del sistema aumenta. Dicha longitud no se puede prolongar indefinidamente para mejorar el rendimiento debido a que la temperatura de salida presenta un comportamiento asintótico con respecto a la longitud del conducto. Ello permite definir una longitud máxima a partir de la cual cualquier aumento influye poco en la temperatura de salida del aire por lo que se hace poco conveniente económicamente.

Se adoptó una longitud de tubos de 90metros, este valor se determinó considerando tanto las condiciones de invierno como de verano , para poder aprovechar al máximo el sistema aplicado , teniendo en cuenta el limitante, en este caso el terreno disponible para la colocación de los tubos.

Es importante destacar que los valores de temperaturas obtenidos fueron comparados con los resultados del experimento de “Casa BAFT” y los mismos son similares, lo cual nos indica que las suposiciones fueron acertadas. A continuación, se presenta en la tabla 21, la comparación de los dos proyectos:

Tabla 21: Comparación de resultados.

	CASA BASF Argentina	EDIFICIO ADIUC
Lugar de emplazamiento:	Tortuguitas, Buenos Aires	Córdoba Capital
Temperatura de Suelo Considerada	Tverano:17,4 °C Tinvierno:18.6°C	Tverano:17°C Tinvierno:18°C
Temperatura Exterior de Diseño	Tverano:32,5°C Tinvierno:3,1°C	Tverano:34,2 °C Tinvierno:1,3°C
Longitud del tubo	78m	90m
Velocidad en el tubo	5m/s	5m/s

Si se tomará en consideración la velocidad del aire dentro del tubo y se desea observar cómo varía la longitud del tubo en función de la misma, el gráfico final son los que se presentan en la Figura 24 .

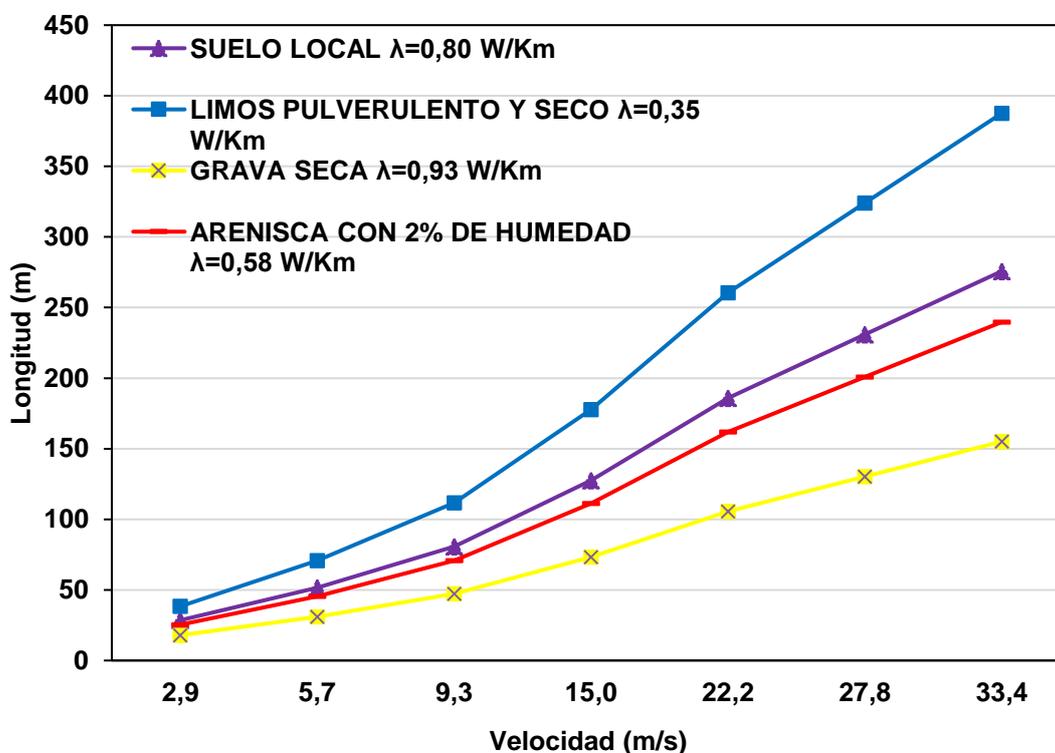


Figura 24: Longitud del tubo vs. Velocidad dentro del tubo, en condiciones de verano.

Para condiciones de invierno se tiene el mismo comportamiento graficad en la Figura 24. Es decir que mientras menor sea la velocidad, menor será la longitud necesaria del tubo para poder obtener una temperatura de 25°C a la salida del mismo, esto se debe a que el aire se encuentra más tiempo en contacto con las paredes del tubo y permiten un mayor intercambio de calor.

5.2. Diseño e implementación en el edificio

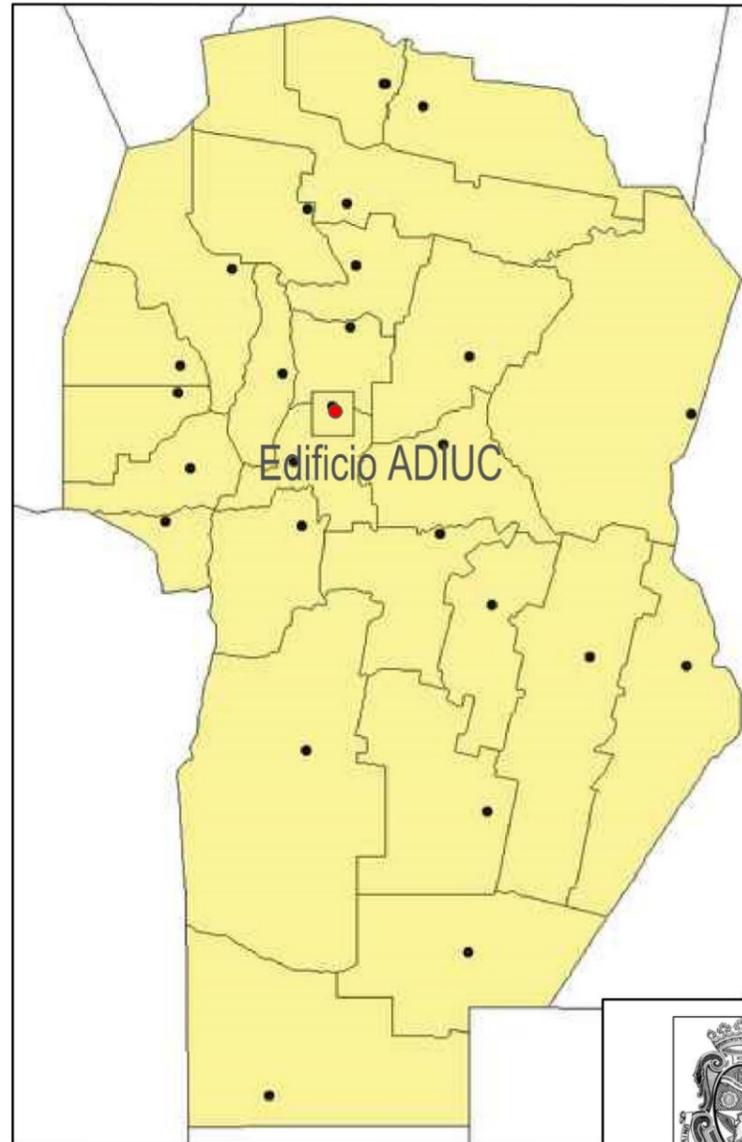
En este apartado se presentan los planos de ubicación, proyecto y detalles de la implementación del sistema de geotermia de baja entalpía:

- Plano 1: Ubicación
- Plano 2: Planta del Edificio
- Plano 3: Proyecto
- Plano 4: Detalles

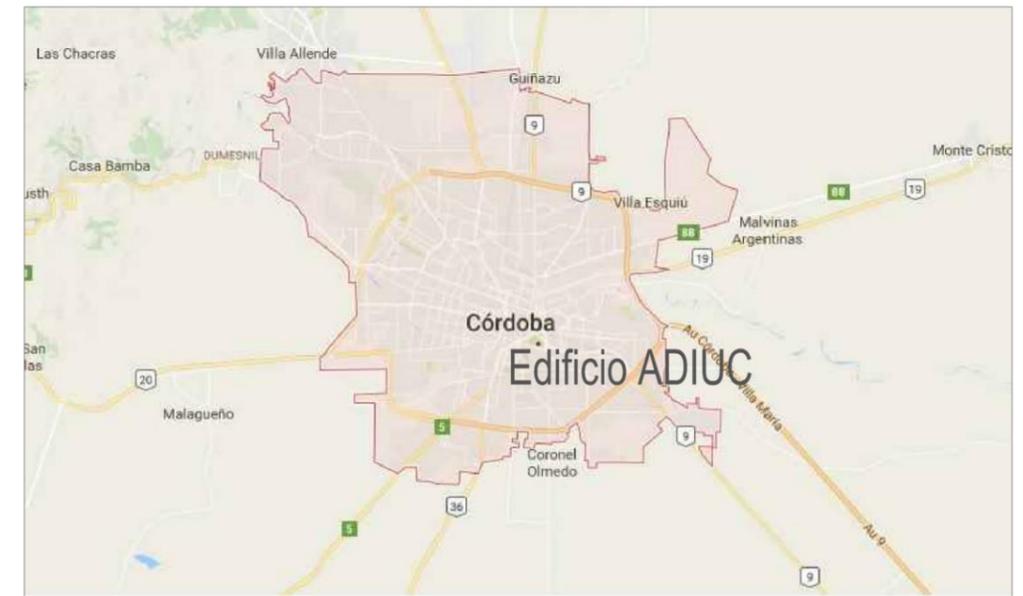
UBICACION EN IMAGEN SATELITAL



UBICACION EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA



UBICACION EN LA MANCHA URBANA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE CÓRDOBA



FCEfyN

Facultad de
Ciencias Exactas
Físicas y Naturales

OBRA: GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA EN
SUELOS LOESSICOS

PLANO

0 0 1

PLANO: UBICACIÓN

LOCALIDAD

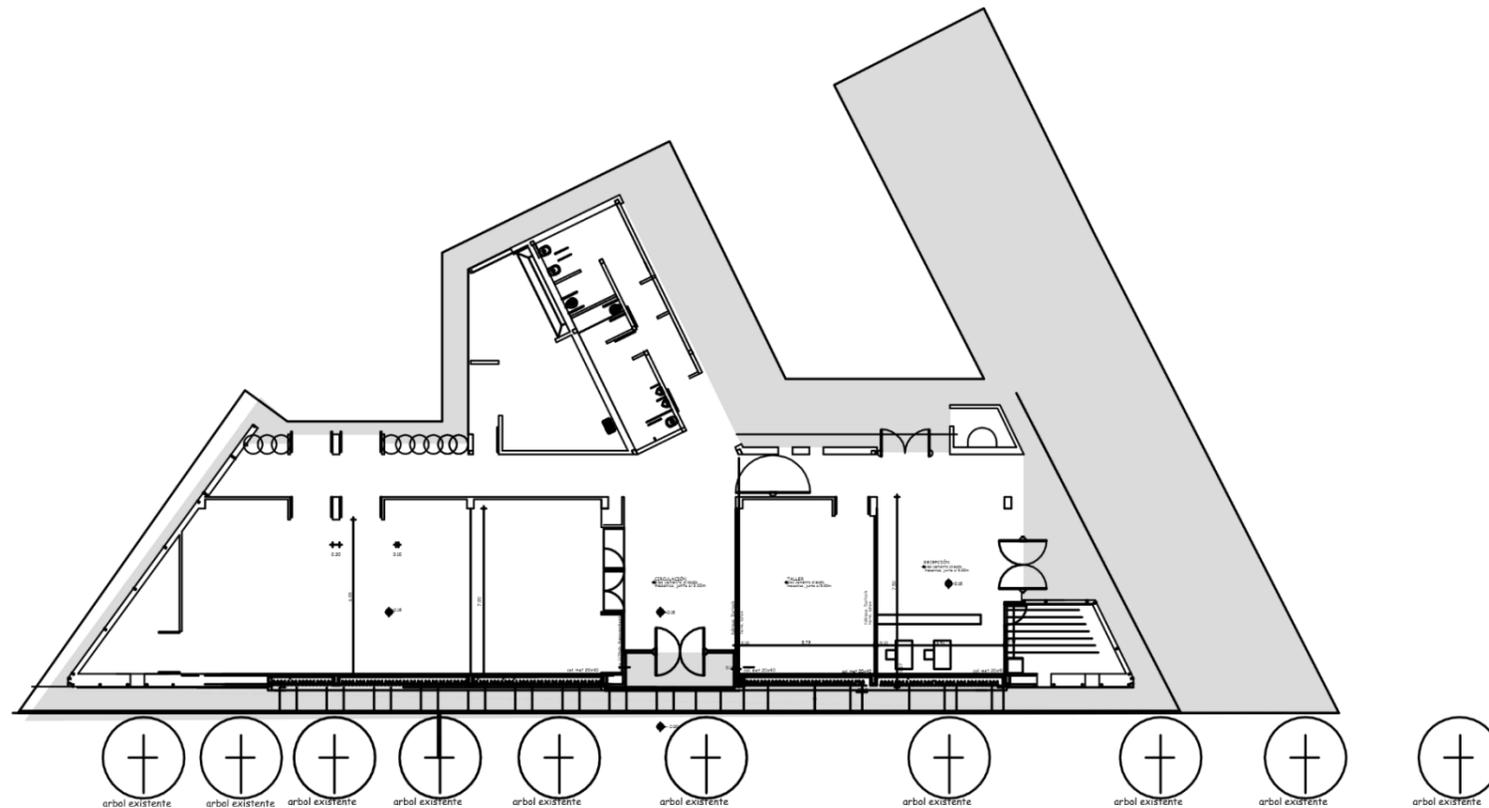
CÓRDOBA

DPTO:

CAPITAL

Practica Supervisada:" Geotermia de baja
entalpía en suelos loessicos"

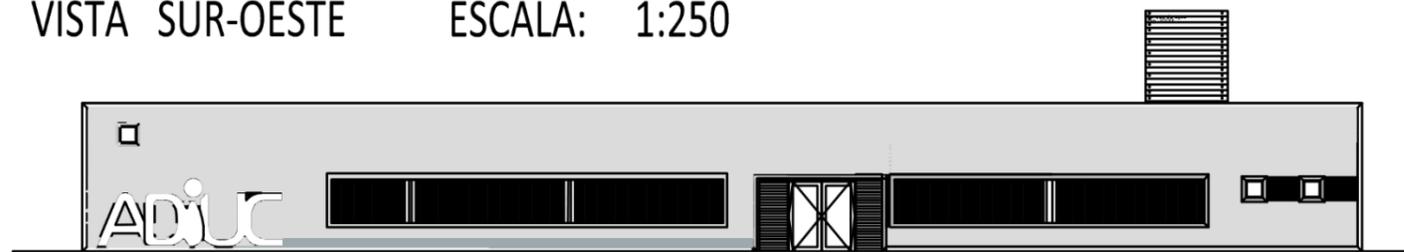
PLANTA ESCALA: 1:300



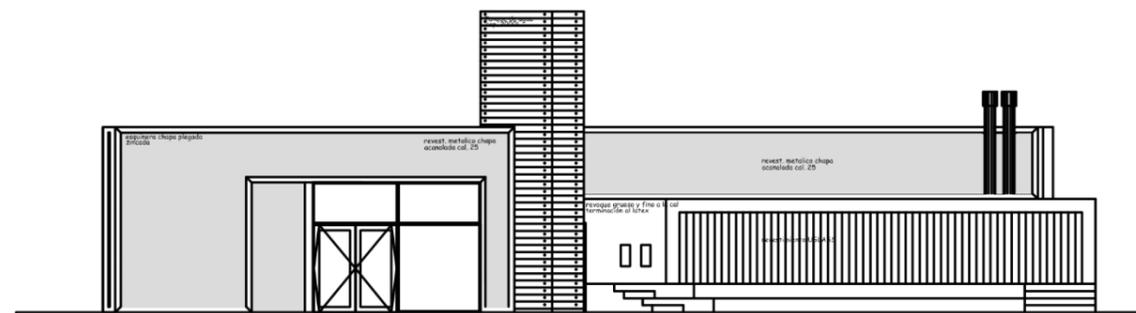
CROQUIS DE UBICACIÓN



VISTA SUR-OESTE ESCALA: 1:250



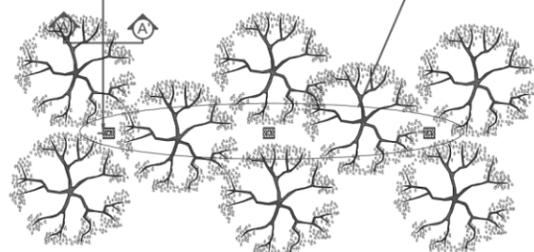
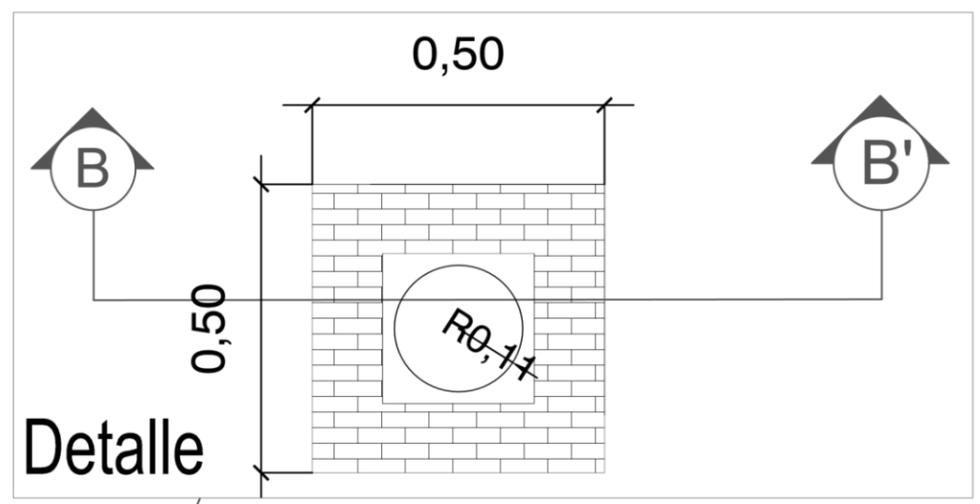
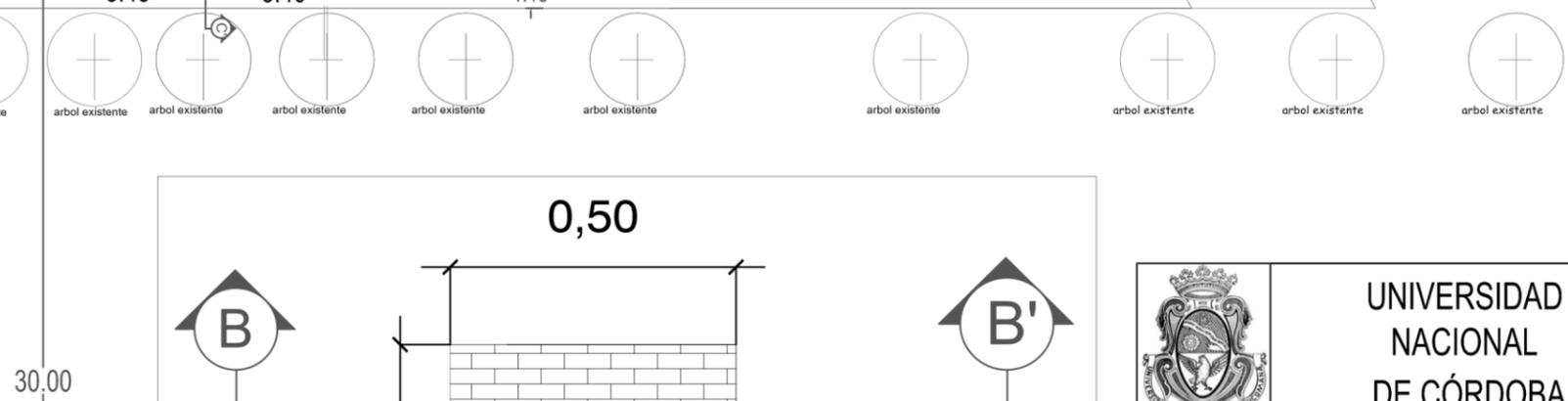
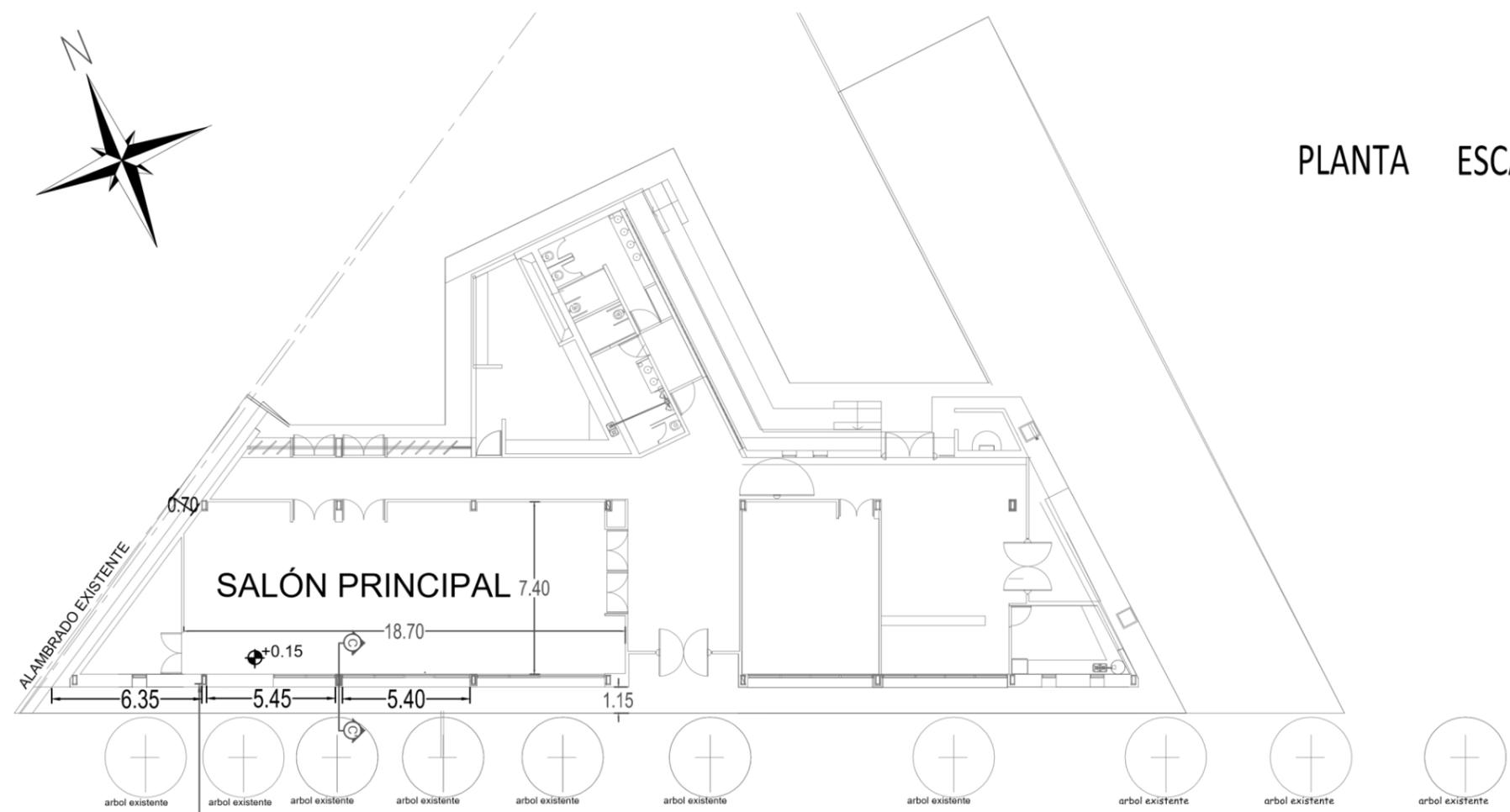
VISTA ESTE ESCALA: 1:200



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA		FCEyN	Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales
				OBRA: GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA EN SUELOS LOESSICOS
PLANO: PLANTA				LOCALIDAD CÓRDOBA
Practica Supervisada: " Geotermia de baja entalpía en suelos loessicos"				DPTO: CAPITAL



PLANTA ESCALA: 1:250



	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA</p>		<p>FCEFyN Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales</p>
<p>OBRA: GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA EN SUELOS LOESSICOS</p>		<p>PLANO 0 0 3</p>	
<p>PLANO: Proyecto</p>		<p>LOCALIDAD</p>	
<p>Practica Supervisada: " Geotermia de baja entalpía en suelos loessicos"</p>		<p>CÓRDOBA</p>	
		<p>DPTO:</p>	
		<p>CAPITAL</p>	

DETALLE A-A'

Nivel de Suelo

Suelo local
suelto

Grava
de 1/2"

R0,11

2,00

0,10

ESCALA: 1:10

Práctica Supervisada Final – Ingeniería Civil – 2017
Agustina Peiretti

DETALLE B-B'

Filtro de carbón activo
Tapa de Ventilación

Tubo PVC
de Ø=0,22m

Ladrillo Ceramico
12x18x33cm

Nivel de Suelo

Suelo local
suelto

Grava de 1/2"

0,26

0,12

1,50

2,00

0,50

0,10

ESCALA: 1:20

DETALLE C-C'

Extractor reversible
30x30cm

0,00

Drenaje

vereda cemento texturado

Suelo Local

Pendiente 2%

2,10

0,10

0,11

0,11

0,28

1,76

1,00

1,33

ESCALA: 1:30



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE CÓRDOBA



FCEfyN
Facultad de
Ciencias Exactas
Físicas y Naturales

OBRA: GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA EN
SUELOS LOESSICOS

PLANO

0 0 4

PLANO: Detalles

LOCALIDAD

CÓRDOBA

DPTO:

CAPITAL

Practica Supervisada: " Geotermia de baja
entalpía en suelos loessicos"

5.3. Evaluación del ahorro energético para el edificio

Considerando la aplicación del método, adoptando 3 tubos de 30 metros cada uno, con una velocidad de 5m/s, se vuelve a calcular el balance energético considerando la disminución de temperatura asociada y luego se compara con los valores iniciales, indicado en la Tabla 22.

Tabla 22: Comparación de resultados de balance térmico.

Sin sistema		Con sistema	
Verano	Invierno	Verano	Invierno
37592	27824	27463	18298
Frigorías/hora	Kcal/hora	Frigorías /hora	Kcal /hora

Se puede observar que sin la aplicación del método se requerían 38kcal/hm^3 en invierno y 60 kcal/hm^3 en verano. Por otro lado, con la incorporación de tubos se requerirían 31 Kcal/hm^3 para calefacción en invierno y 46 frigorías/hm^3 para refrigeración en verano. Los resultados obtenidos permiten demostrar que se lograría un ahorro energético significativo, sobretodo en la época estival donde la reducción es de un 25% aproximadamente y en 20% en época invernal. Se realiza un cálculo económico, se tiene para las condiciones de invierno:

Sin aplicación del sistema y considerando que se utilizan 4 aires acondicionados de 6000 frigorías/hora suponiendo que están encendidos entre 5 y 6 horas por día unos 15 días al mes, se tiene un costo mensual de \$1031,00 para 5 horas y \$1373,00 para 6 horas considerando el cuadro tarifario de Empresa Provincial de Energía Córdoba (EPEC) y los valores de consumo se obtuvieron de la página web de INTI.

Si se realiza el mismo cálculo considerando que el sistema esta aplicado, con la misma cantidad de aires acondicionados pero los cuales estarán en funcionamiento por 3 o 4 horas ,considerando que las temperaturas modificadas debidas a la aplicación del método, es decir, ya que se va a tener una temperatura más elevada en invierno y menos en verano, la necesidad de encender un elemento complementario es menor; pero manteniendo la misma cantidad de días de

utilización se tiene un valor que varía entre: \$815 para 4 horas y \$536,6 para 3 horas.

Se puede decir que se produce una disminución del costo en un **50%**, lo cual es muy apreciable.

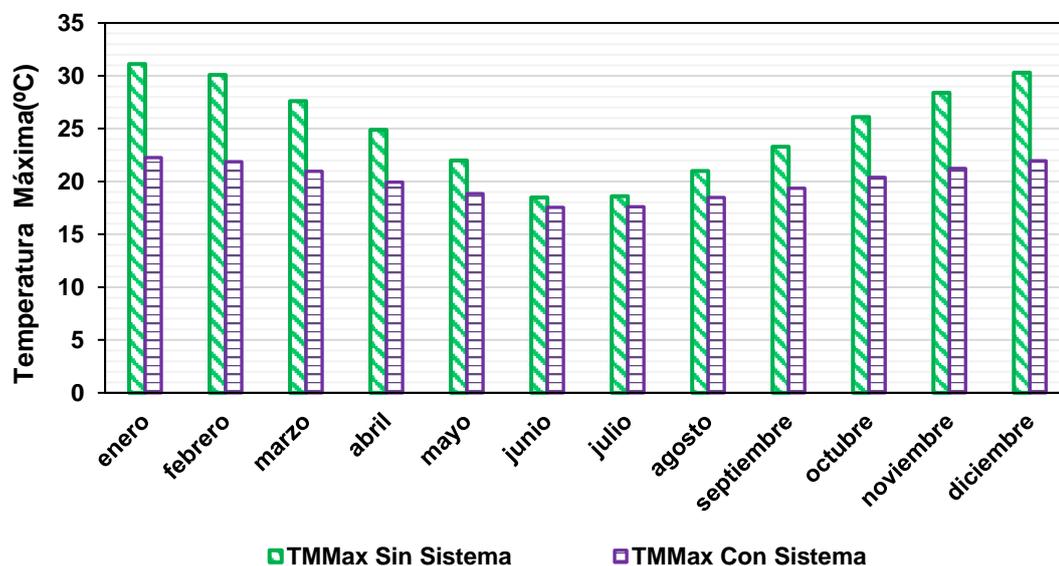


Figura 25: Comparación de las temperaturas máximas con la implementación del sistema y sin él.

En el gráfico anterior se puede ver a simple vista, como se ve disminuida la temperatura a la salida del tubo, cuando el sistema está aplicado.

5.4. Análisis de variabilidad o confiabilidad

A continuación, se muestran los resultados obtenidos, cuando se realiza una modificación de la conductividad del suelo en un $\pm 0,10$ W/mK.

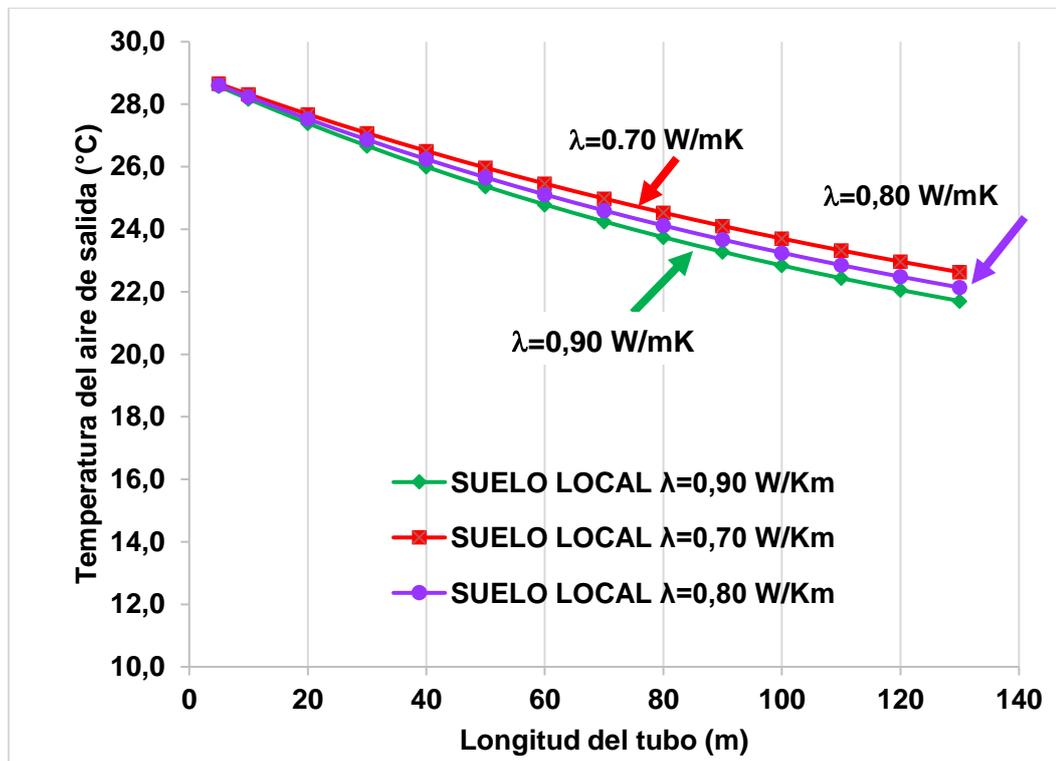


Figura 26: Gráfico con variación de la conductividad térmica.

Como se puede observar en el gráfico anterior, a medida que la conductividad del suelo es mayor, mayores son las temperaturas alcanzadas, para una misma longitud de tubo.

Esto es a razón de que mientras mayor es la conductividad del suelo, esto permite un mayor intercambio de calor del aire, lo que genera que el ΔT de temperatura se incremente.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Como primer punto se puede señalar, la importancia de buscar nuevas tecnologías que pueden ser aplicadas con el fin de satisfacer necesidades de la sociedad y a su vez hacer uso de un recurso natural y renovable como lo es la energía geotérmica.

El uso de energía geotérmica de baja entalpía por medio de un sistema de tubos enterrados puede utilizarse en cualquier lugar del mundo, solo hay que conocer algunas características del lugar de emplazamiento y las características del suelo.

A diferencia de las otras fuentes de energía, la geotermia ofrece un flujo constante y uniforme independientemente de variaciones estacionales ya sean lluvias, sol, viento, etc.

Los intercambiadores de calor tierra-aire, se basan en la utilización de la energía térmica del subsuelo para pretratar el aire de ventilación de los edificios contribuyendo a reducir la temperatura del aquel que ingresa en los edificios durante el verano y aumentándola durante el invierno.

Cabe destacar que los pozos provenzales/canadienses por si solos resultan muy eficientes en la refrigeración en verano, haciendo que puedan sustituir perfectamente a los convencionales sistemas de aire acondicionado. La comparación del gasto de energía que tienen los pozos provenzales (un extractor de poco consumo cuando el sistema de extracción es mecánico) con los grandes costos que tienen los aires acondicionados, decantan claramente la balanza a favor de los primeros.

En invierno, en cambio, los pozos pueden resultar insuficientes por si solos para aportar el calor necesario para la climatización de un edificio dependiendo de la latitud. Sin embargo, pueden ofrecer un importante precalentado del aire lo que supondrá un sustancial ahorro, ya que el salto térmico que tendrá que aportar el sistema de climatización artificial se verá reducido.

Las ventajas de estos sistemas son numerosas: requieren una inversión mucho menor que una climatización reversible convencional, en especial si el diseño del edificio ya contempla dicha posibilidad, son de mantenimiento muy sobrio y completamente sostenibles y ecológicos.

Es viable la aplicación del sistema para este tipo de edificación, si se tienen en cuenta dos aspectos importantes en relación a su tipo de construcción

(construcción en seco), el primero: la posibilidad de adaptación del sistema a la disposición del edificio sin la necesidad de modificar la estructura, por otro lado es importante destacar que la envolvente estuviese formada por un material con mayor conductividad térmica, por ejemplo ladrillo cerámico, la resistencia total del muro sería mayor , lo que contribuye al balance térmico general.

La aplicación en suelos loessicos permitiría según los cálculos una disminución en el consumo de energía de aproximadamente un 25%, lo que significa a su vez ahorro económico.

CAPÍTULO 7: REFERENCIAS

Bidarmaghz, Makasis, Narsilio, Francisca and Carro Pérez. Geothermal energy in loess. (2015)

Bustos, Nicolás. (2015). Revolución 21. Alternativas de Resolución a la Situación Energética en Argentina. <http://revolucion21.org>

Cabezas, Ana María. (2012). Eficiencia energética a través de utilización de tubos canadienses con el análisis de datos de un caso real.

Cárcel Carrasco, F. J., & Márquez, D. M. (2015). La Energía Geotérmica De Baja Entalpía. *3C Tecnología*, 4(3).

Clasificación Bioambiental de la República Argentina.

DeWitt David P. (1999); "Fundamentos de la transferencia de calor". 4ta Edición. Editorial: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

Empresa Provincial de Energía de Córdoba, EPEC .2017. https://www.epec.com.ar/docs/cuadro-tarifario/tarifa_n1_Res202.pdf

Escuer Gomis, J. (2007). Memorias de un republicano español deportado al campo de Dachau.

Franco M. Francisca. (2011). ENSAYO DE PENETRACIÓN STANDARD

Gerónimo J. Cárdenas, (2010) Matriz energética argentina. Situación actual y posibilidades de diversificación. Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario.

Google earth. 2017. <https://earth.google.com>

Hollmuller, Pierre, and Bernard Marie Lachal. (2005) "Buried pipe systems with sensible and latent heat exchanges: validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring".

Ingesolum, (2008). Primer Congreso GeoEner. [http://www.madridsubterra.es/wp-content/uploads/2015/12/documentacion/Ingeosolum%20\(gotermia%20de%20Madrid\).pdf](http://www.madridsubterra.es/wp-content/uploads/2015/12/documentacion/Ingeosolum%20(gotermia%20de%20Madrid).pdf)

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE. 2008." Manual de La geotermia".

IRAM 11601(2004): Aislamiento térmico de edificios. Método de cálculo.

IRAM 11603(1996): Acondicionamiento Térmico de edificios.

IRAM 11605(1996): Acondicionamiento Térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos admisibles de transmitancia térmica en cerramiento opacos.

Jaramillo, O. A. (2007). Intercambiadores de calor. *Centro de Investigación en Energía, 10*.

Leila, Iannelli, E.J. Bezzo, Angel. Bermejo, Pedro, Cozza, Jorge, Fiora, J.A. Niño, Roberto, Prieto, P. Romero y Salvador, Gil. (2012) Uso de energía geotérmica para el acondicionamiento de aire en viviendas.

Manuel Zamora Carranza (1998), Termo I: Un estudio de los sistemas termodinámicos.

Michel De Paepe y Arnold Janssens (2002). Thermo-hydraulic desing of earth-air heat exchangers.

Ministerio de Energía y Minería. (2015). "Matriz Energética Actualizada de La Republica Argentina".
<http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3366>

Pérez Ramírez de Arellano, Alejandro. (2015). *Proyecto de Instalación Geotérmica de Muy Baja Entalpía Destinada a Refrigeración de Vivienda Unifamiliar* (Doctoral dissertation).

REHAU. (2016). www.rehau.com/es-es

Santamarta, José. (2006). "Las Energías Renovables son el Futuro.

Strelin, J. 2012. A rescue plan for the geological record of the Santa Cruz River Valley (The Condor Cliff and La Barrancosa damming Projects)



ANEXO: TABLAS DE CÁLCULO

PARAMETROS VERANO				
		AIRE	SUELO	TUBO
Conductividad térmica (λ)	W/Km	0,025	0,8	0,16
Densidad (ρ)	Kg/m ³	1,1489		
Capacidad térmica	J/KgK	1007		
μ (viscosidad dinámica)		0,00001895		
ν (viscosidad cinemática)	m ² /s	1,6494E-05		
α (difusividad térmica)		0,00002265		

Espesor del suelo	2	m
-------------------	---	---

PARAMETROS INVIERNO				
		AIRE	SUELO	TUBO
Conductividad térmica (λ)	W/Km	0,025	0,8	0,16
Densidad (ρ)	Kg/m ³	1,286		
Capacidad térmica	J/KgK	1006		
μ (viscosidad dinámica)		0,00001743		
ν (viscosidad cinemática)	m ² /s	1,35537E-05		
α (difusividad térmica)		0,00001834		

Espesor del suelo	2	m
-------------------	---	---

CONDICIONES DE VERANO

Temperatura del aire al ingreso: Constante; Velocidad dentro del tubo: Constante; Longitud del tubo: Variable

ϕ_e (m)	L (m)	Área (m ²)	V(m/s)	Q (m ³ /s)	\dot{m}_{air} (kg/seg)	Re (adim)	ϵ	u_n	Pr	Rair (K/W)	Rtubo (K/W)	Rsoil (K/W)	Rt (K/W)	UA (W/K)	NTU (adim)	ϵ (adim)	Tair,in (°C)	Tsuelo (°C)	Tair,out (°C)
0,22	5,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0191	0,0027	0,12	0,14	7,17	0,03	0,03	30,7	17	30,3
0,22	10,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0096	0,0014	0,06	0,07	14,35	0,07	0,06	30,7	17	29,8
0,22	20,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0048	0,0007	0,03	0,03	28,70	0,13	0,12	30,7	17	29,0
0,22	30,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0032	0,0005	0,02	0,02	43,05	0,20	0,18	30,7	17	28,3
0,22	40,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0024	0,0003	0,01	0,02	57,40	0,26	0,23	30,7	17	27,6
0,22	50,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0019	0,0003	0,01	0,01	71,75	0,33	0,28	30,7	17	26,9
0,22	60,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0016	0,0002	0,01	0,01	86,10	0,39	0,32	30,7	17	26,3
0,22	70,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0014	0,0002	0,01	0,01	100,45	0,46	0,37	30,7	17	25,7
0,22	80,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0012	0,0002	0,01	0,01	114,80	0,52	0,41	30,7	17	25,1
0,22	90,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0011	0,0002	0,01	0,01	129,15	0,59	0,44	30,7	17	24,6
0,22	100,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0010	0,0001	0,01	0,01	143,50	0,65	0,48	30,7	17	24,1

Temperatura el aire al ingreso: Variable; Velocidad dentro del tubo: Variable; Longitud del tubo: Variable

ϕ_e (m)	L (m)	Area (m ²)	V(m/s)	Q (m ³ /s)	\dot{m}_{air} (kg/seg)	Re (adim)	ϵ	un	Pr	Rair (K/W)	Rtube (K/W)	Rsoil (K/W)	Rt (K/W)	UA (W/K)	NTU (adim)	ϵ (adim)	Tair,in (°C)	Tsuelo (°C)	Tair,out (°C)
0,22	5,00	0,038	1	0,04	0,04	13338,2	0,03	38,19	0,73	0,0667	0,0027	0,12	0,19	5,35	0,12	0,11	34,2	17	32,23
0,22	10,00	0,038	3	0,11	0,13	40014,5	0,02	89,66	0,73	0,0142	0,0014	0,06	0,07	13,45	0,10	0,10	33	17	31,45
0,22	20,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0048	0,0007	0,03	0,03	28,70	0,13	0,12	32	17	30,16
0,22	30,00	0,038	7	0,27	0,31	93367,1	0,02	173,33	0,73	0,0024	0,0005	0,02	0,02	44,46	0,14	0,13	31	17	29,12
0,22	40,00	0,038	9	0,34	0,39	120043,4	0,02	211,15	0,73	0,0015	0,0003	0,01	0,02	60,46	0,15	0,14	30	17	28,16
0,22	50,00	0,038	11	0,42	0,48	146719,7	0,02	247,37	0,73	0,0010	0,0003	0,01	0,01	76,59	0,16	0,15	29	17	27,24
0,22	60,00	0,038	13	0,49	0,57	173396,0	0,02	282,37	0,73	0,0008	0,0002	0,01	0,01	92,82	0,16	0,15	28	17	26,35
0,22	70,00	0,038	15	0,57	0,66	200072,3	0,02	316,37	0,73	0,0006	0,0002	0,01	0,01	109,11	0,17	0,15	27	17	25,48
0,22	80,00	0,038	17	0,65	0,74	226748,6	0,02	349,55	0,73	0,0005	0,0002	0,01	0,01	125,44	0,17	0,15	26	17	24,61
0,22	90,00	0,038	19	0,72	0,83	253424,9	0,01	382,03	0,73	0,0004	0,0002	0,01	0,01	141,81	0,17	0,16	25	17	23,75
0,22	100,00	0,038	21	0,80	0,92	280101,2	0,01	413,90	0,73	0,0003	0,0001	0,01	0,01	158,20	0,17	0,16	24	17	22,90

Longitud del tubo: constante; Temperatura del aire de ingreso: Variable; Velocidad: Variable

ϕ_e (m)	L (m)	Area (m ²)	V(m/s)	Q (m ³ /s)	\dot{m}_{air} (kg/seg)	Re (adim)	ϵ	un	Pr	Rair (K/W)	Rtube (K/W)	Rsoil (K/W)	Rt (K/W)	UA (W/K)	NTU (adim)	ϵ (adim)	Tair,in (°C)	Tsuelo (°C)	Tair,out (°C)
0,22	30,00	0,038	1	0,04	0,04	13338,2	0,03	38,19	0,73	0,0111	0,0005	0,02	0,03	32,09	0,73	0,52	34,2	17	25,29
0,22	30,00	0,038	3	0,11	0,13	40014,5	0,02	89,66	0,73	0,0047	0,0005	0,02	0,02	40,36	0,31	0,26	33	17	28,78
0,22	30,00	0,038	5	0,19	0,22	66690,8	0,02	133,27	0,73	0,0032	0,0005	0,02	0,02	43,05	0,20	0,18	32	17	29,33
0,22	30,00	0,038	7	0,27	0,31	93367,1	0,02	173,33	0,73	0,0024	0,0005	0,02	0,02	44,46	0,14	0,13	31	17	29,12
0,22	30,00	0,038	9	0,34	0,39	120043,4	0,02	211,15	0,73	0,0020	0,0005	0,02	0,02	45,34	0,11	0,11	30	17	28,59
0,22	30,00	0,038	11	0,42	0,48	146719,7	0,02	247,37	0,73	0,0017	0,0005	0,02	0,02	45,96	0,09	0,09	29	17	27,91
0,22	30,00	0,038	13	0,49	0,57	173396,0	0,02	282,37	0,73	0,0015	0,0005	0,02	0,02	46,41	0,08	0,08	28	17	27,14
0,22	30,00	0,038	15	0,57	0,66	200072,3	0,02	316,37	0,73	0,0013	0,0005	0,02	0,02	46,76	0,07	0,07	27	17	26,32
0,22	30,00	0,038	17	0,65	0,74	226748,6	0,02	349,55	0,73	0,0012	0,0005	0,02	0,02	47,04	0,06	0,06	26	17	25,45
0,22	30,00	0,038	19	0,72	0,83	253424,9	0,01	382,03	0,73	0,0011	0,0005	0,02	0,02	47,27	0,06	0,05	25	17	24,56
0,22	30,00	0,038	21	0,80	0,92	280101,2	0,01	413,90	0,73	0,0010	0,0005	0,02	0,02	47,46	0,05	0,05	24	17	23,65

CONDICIONES DE INVIERNO

Temperatura del aire al ingreso: Constante; Velocidad dentro del tubo: Constante; Longitud del tubo: Variable

ϕ_e (m)	L (m)	Area (m ²)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	\dot{m}_{air} (kg/seg)	Re (adim)	ϵ	un	Pr	Rair (K/W)	Rtube (K/W)	Rsoil (K/W)	Rt (K/W)	UA (W/K)	NTU (adim)	e (adim)	Tair,in (°C)	Tsuelo (°C)	Tair,out (°C)
0,22	5	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0162	0,0027	0,12	0,14	7,33	0,03	0,03	5,8	18	6,16
0,22	10	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0081	0,0014	0,06	0,07	14,65	0,06	0,06	5,8	18	6,51
0,22	20	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0041	0,0007	0,03	0,03	29,30	0,12	0,11	5,8	18	7,17
0,22	30	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0027	0,0005	0,02	0,02	43,95	0,18	0,16	5,8	18	7,80
0,22	40	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0020	0,0003	0,01	0,02	58,60	0,24	0,21	5,8	18	8,39
0,22	50	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0016	0,0003	0,01	0,01	73,25	0,30	0,26	5,8	18	8,94
0,22	60	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0014	0,0002	0,01	0,01	87,91	0,36	0,30	5,8	18	9,47
0,22	70	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0012	0,0002	0,01	0,01	102,56	0,42	0,34	5,8	18	9,96
0,22	80	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0010	0,0002	0,01	0,01	117,21	0,48	0,38	5,8	18	10,43
0,22	90	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0009	0,0002	0,01	0,01	131,86	0,54	0,42	5,8	18	10,86
0,22	100	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0008	0,0001	0,01	0,01	146,51	0,60	0,45	5,8	18	11,28

Temperatura el aire al ingreso: Variable; Velocidad dentro del tubo: Variable; Longitud del tubo: Variable

ϕ_e (m)	L (m)	Area (m ²)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	\dot{m}_{air} (kg/seg)	Re (adim)	ϵ	un	Pr	Rair (K/W)	Rtube (K/W)	Rsoil (K/W)	Rt (K/W)	UA (W/K)	NTU (adim)	e (adim)	Tair,in (°C)	Tsuelo (°C)	Tair,out (°C)
0,22	5	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0162	0,0027	0,12	0,14	7,33	0,03	0,03	15	18	15,09
0,22	10	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0081	0,0014	0,06	0,07	14,65	0,06	0,06	14	18	14,23
0,22	20	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0041	0,0007	0,03	0,03	29,30	0,12	0,11	13	18	13,56
0,22	30	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0027	0,0005	0,02	0,02	43,95	0,18	0,16	12	18	12,98
0,22	40	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0020	0,0003	0,01	0,02	58,60	0,24	0,21	11	18	12,48
0,22	50	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0016	0,0003	0,01	0,01	73,25	0,30	0,26	10	18	12,06
0,22	60	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0014	0,0002	0,01	0,01	87,91	0,36	0,30	9	18	11,71
0,22	70	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0012	0,0002	0,01	0,01	102,56	0,42	0,34	8	18	11,41
0,22	80	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0010	0,0002	0,01	0,01	117,21	0,48	0,38	7	18	11,17
0,22	90	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0009	0,0002	0,01	0,01	131,86	0,54	0,42	6	18	10,98
0,22	100	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0008	0,0001	0,01	0,01	146,51	0,60	0,45	5	18	10,84

Longitud del tubo: constante; Temperatura del aire de ingreso: Variable; Velocidad: Variable

ϕ_e (m)	L (m)	Area (m ²)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	m _{air} (kg/seg)	Re (adim)	ϵ	un	Pr	R _{air} (K/W)	R _{tube} (K/W)	R _{soil} (K/W)	R _t (K/W)	UA (W/K)	NTU (adim)	e (adim)	T _{air,in} (°C)	T _{suelo} (°C)	T _{air,out} (°C)
0,22	30	0,04	1	0,04	0,05	16231,78	0,03	44,90	0,74	0,0095	0,0005	0,02	0,03	33,90	0,69	0,50	15	18	16,49
0,22	30	0,04	3	0,11	0,15	48695,35	0,02	105,31	0,74	0,0040	0,0005	0,02	0,02	41,54	0,28	0,25	14	18	14,98
0,22	30	0,04	5	0,19	0,24	81158,92	0,02	156,76	0,74	0,0027	0,0005	0,02	0,02	43,95	0,18	0,16	13	18	13,82
0,22	30	0,04	7	0,27	0,34	113622,49	0,02	204,12	0,74	0,0021	0,0005	0,02	0,02	45,20	0,13	0,12	12	18	12,74
0,22	30	0,04	9	0,34	0,44	146086,06	0,02	248,89	0,74	0,0017	0,0005	0,02	0,02	45,98	0,10	0,10	11	18	11,69
0,22	30	0,04	11	0,42	0,54	178549,63	0,02	291,81	0,74	0,0015	0,0005	0,02	0,02	46,51	0,09	0,08	10	18	10,66
0,22	30	0,04	13	0,49	0,64	211013,20	0,02	333,31	0,74	0,0013	0,0005	0,02	0,02	46,91	0,07	0,07	9	18	9,64
0,22	30	0,04	15	0,57	0,73	243476,76	0,02	373,65	0,74	0,0011	0,0005	0,02	0,02	47,21	0,06	0,06	8	18	8,62
0,22	30	0,04	17	0,65	0,83	275940,33	0,01	413,04	0,74	0,0010	0,0005	0,02	0,02	47,46	0,06	0,06	7	18	7,61
0,22	30	0,04	19	0,72	0,93	308403,90	0,01	451,61	0,74	0,0009	0,0005	0,02	0,02	47,66	0,05	0,05	6	18	6,60
0,22	30	0,04	21	0,80	1,03	340867,47	0,01	489,48	0,74	0,0009	0,0005	0,02	0,02	47,82	0,05	0,05	5	18	5,59
0,22	30	0,04	23	0,87	1,12	373331,04	0,01	526,72	0,74	0,0008	0,0005	0,02	0,02	47,96	0,04	0,04	4	18	4,58
0,22	30	0,04	25	0,95	1,22	405794,61	0,01	563,40	0,74	0,0008	0,0005	0,02	0,02	48,08	0,04	0,04	3	18	3,58
0,22	30	0,04	27	1,03	1,32	438258,18	0,01	599,59	0,74	0,0007	0,0005	0,02	0,02	48,19	0,04	0,04	2	18	2,57
0,22	30	0,04	29	1,10	1,42	470721,74	0,01	635,32	0,74	0,0007	0,0005	0,02	0,02	48,28	0,03	0,03	1	18	1,57

ANÁLISIS DE AMORTIZACIÓN

Inversión	\$ 36.129,65
------------------	---------------------

Periodo(años)	Capital	Cuota	Capital Restante
0	-36129,65		-\$ 36.129,65
1		\$ 4.120,00	-\$ 32.009,65
2		\$ 5.356,00	-\$ 26.653,65
3		\$ 6.962,80	-\$ 19.690,85
4		\$ 9.051,60	-\$ 10.639,25
5		\$ 11.767,10	\$ 1.127,85

Se supone una cuota igual al ahorro que se tiene de la factura de EPEC, considerando un aumento anual de la factura del 30%

Se recupera la inversión al 5 año de construido.

El valor de inversión se obtuvo de realizar un análisis de precios unitarios sobre todos los ítems intervinientes para la ejecución del sistema, a precios de 2017.