



## “ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA VIVIENDAS EN CÓRDOBA”

AUTOR - ARQUITECTO ANDRES GUSTAVO RODRÍGUEZ LEGUIZAMON

DIRECTOR - DR. RAMIRO RODRÍGUEZ



FAUDI — AÑO 2021

© Derechos de autor

Julio de 2021

## RESUMEN

El presente trabajo es el desarrollo teórico, de investigación bibliográfica y de aplicación a un caso de estudio, del potencial del sistema de geotermia somera o de baja entalpía en el sector residencial en la provincia de Córdoba, Argentina. El principal objetivo es obtener condiciones de confort de espacios internos; reduciendo el consumo de energía no renovable de la edificación.

El caso de estudio plantea la climatización de una vivienda unifamiliar mediante el empleo de un sistema intercambiador de calor tierra – aire (ICTA) en anillo, debido a que se utiliza un único conducto, a una profundidad entre 2 y 3 metros.

El material del conducto es PVC, el cual, a lo largo de un recorrido de 30 metros en pendiente 1:100, logra el intercambio de calor del aire exterior con el terreno, para distribuirlo en los puntos terminales y mezclarlo con el aire interior para climatizar los ambientes.

Los resultados de aplicación de un método analítico de cálculo del ICTA, se compararon con el modelado computacional con SIMEDIF, obteniendo resultados coherentes que permitieron enunciar conclusiones sobre la eficiencia del sistema.

## AGRADECIMIENTOS

Con la motivación de conocer el desarrollo de la energía geotérmica en nuestra región, he visto una buena oportunidad de aportar un enfoque alternativo hacia la eficiencia energética en el ámbito local. Es por ello, que doy gracias a la UNC, a la FAUDI y a todos los profesores, por brindarme las herramientas necesarias para afrontar un desafío de este tipo. Valoro y agradezco el avance académico y personal que me ha supuesto superar este posgrado y descubrir un nuevo camino sobre el cual quiero especializarme y desarrollarme profesionalmente.

A su vez, también quiero agradecerse al Doctor Ramiro Rodríguez, quien ha contribuido continuamente a lo largo de este TF, brindándome las herramientas necesarias para abordar un trabajo de esta envergadura.

Por último, quiero agradecer a mi novia y a mi familia, por toda la ayuda y soporte emocional que me han dado y sin los cuales no hubiese podido realizar estos estudios.

## CONTENIDO

1.	MOTIVACIÓN E INTRODUCCIÓN.....	6
2.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ENERGÉTICO - AMBIENTAL .....	7
	Problema energético local .....	11
3.	MARCO DE REFERENCIA CONCEPTUAL .....	13
	Distribución del consumo energético nacional .....	13
	La tierra como acondicionador térmico .....	13
	Sistema Intercambio de Calor Tierra – Aire (ICTA).....	15
	Acondicionamiento térmico y consumo de energía en viviendas.....	16
	Estimación del factor de ahorro de energía en el acondicionamiento térmico .....	18
	Ejemplo de cálculo y diseño para caso de estudio local.....	19
	Simulación de Ductos con SIMEDIF .....	20
4.	ANTECEDENTES .....	24
	Agua caliente a partir de sistema geotérmico .....	28
5.	FORMULACIÓN DE PREGUNTA – HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....	30
	Pregunta.....	30
	Hipótesis.....	30
	Objetivo general.....	30
	Objetivos particulares .....	30
6.	METODOLOGÍA.....	31
	Materiales y Métodos .....	31
	Plan de actividades y cronograma .....	31
	Recursos previstos .....	31
7.	CASO DE ESTUDIO .....	32
	Descripción del Proyecto: Viviendas Duplex .....	32
	Construcción: tipología y componentes del ICTA .....	34
	Condiciones del Terreno.....	35
	Proceso físico.....	36
	Dimensionado.....	37
	Cálculo .....	38
	Simulación del Caso de Estudio con SIMEDIF.....	40
	Análisis de costos de instalación .....	43
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	44
9.	CONCLUSIÓN .....	45

10. REFERENCIAS ..... 46

# 1. MOTIVACIÓN E INTRODUCCIÓN

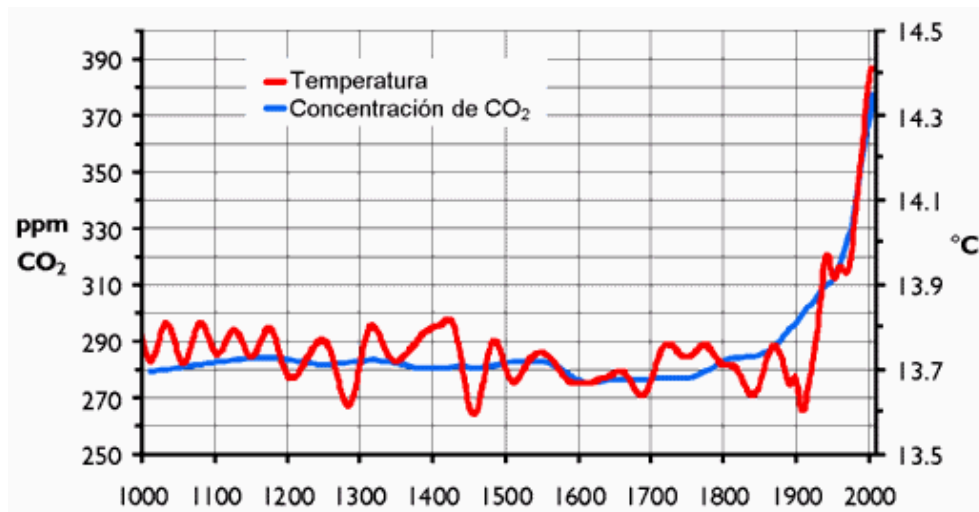
Entender la problemática energética mundial, es una necesidad y una responsabilidad que debe asumir la población en general y los profesionales ligados a su gestión en particular, debido a los impactos que genera su demanda. Este trabajo trata sobre el estudio de factibilidad de uso de sistemas GEOTÉRMICOS DE BAJA ENTALPÍA para CLIMATIZACIÓN integrados a la arquitectura, como alivio a los consumos energéticos anuales, aplicado a la provincia de Córdoba, Argentina.

Se aborda la problemática ENÉRGICA porque los arquitectos deben asumir un rol protagónico en el control del impacto ambiental mediante nuestros proyectos acorde al concepto de desarrollo sustentable, considerando el uso de recursos naturales sin comprometer esta posibilidad para generaciones futuras.

Se pretende conocer en detalle nuevas alternativas que mejoren las condiciones de confort térmico residencial y opto por la GEOTERMIA, asumiendo que es una temática poco desarrollada en el ámbito LOCAL y sobre la que considero se puede obtener gran beneficio ambiental y energético, si se aplica correctamente.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ENERGÉTICO - AMBIENTAL

El cambio climático es parte de la evolución natural del planeta y su entorno y además está vinculado al desarrollo la humanidad [1]. La intervención del hombre en su afán de desarrollo ha provocado la modificación de ecosistemas vitales para su propia existencia. En tan solo 100 años ha multiplicado el consumo energético 16 veces, provocando un aumento en la contaminación del aire hasta alcanzar niveles insostenibles [2]. El exceso de emisión de gases dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalentes generados por el uso de combustibles fósiles, ha incrementado el efecto invernadero [3]. En la **Figura 1** podemos ver la relación entre la variación de la temperatura del planeta y la concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo del último milenio.



**Figura 1.** Relación entre la concentración de CO<sub>2</sub> (azul) y la temperatura (rojo) durante el último milenio [4].

Esta figura evidencia la correlación entre estas variables, donde se puede observar que no existen, en la historia reciente del planeta, niveles tan altos de CO<sub>2</sub> como los últimos 100 años [5].

La **Figura 2** muestra el pronóstico de aumento de la temperatura global, según distintos escenarios [6].

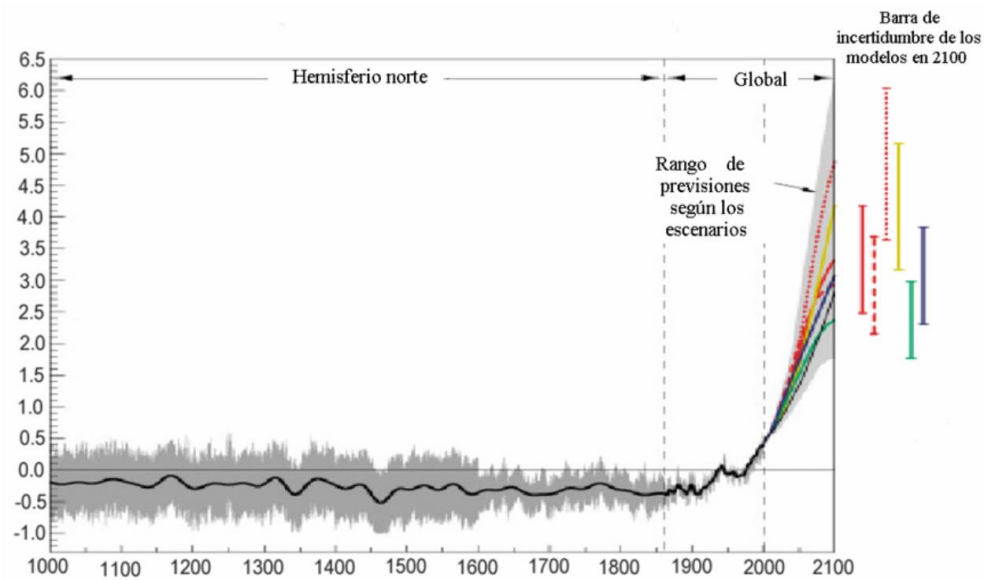


Figura 2. Pronósticos del incremento de la temperatura en el futuro [7].

No obstante, los datos muestran claramente que la variación en la concentración de  $\text{CO}_2$  atmosférico, se incrementa por causas no naturales con la industrialización y rápido crecimiento de la población mundial, durante los últimos 150 años. La tasa de aumento se aceleró considerablemente en los últimos 50 años debido al uso de combustibles fósiles. Entre los que más impacto generan en su utilización, encontramos al carbón y el petróleo, mientras que las emisiones por geotermia son las de menor impacto [8]. En la Figura 3, podemos apreciar estas relaciones para el caso de EEUU.

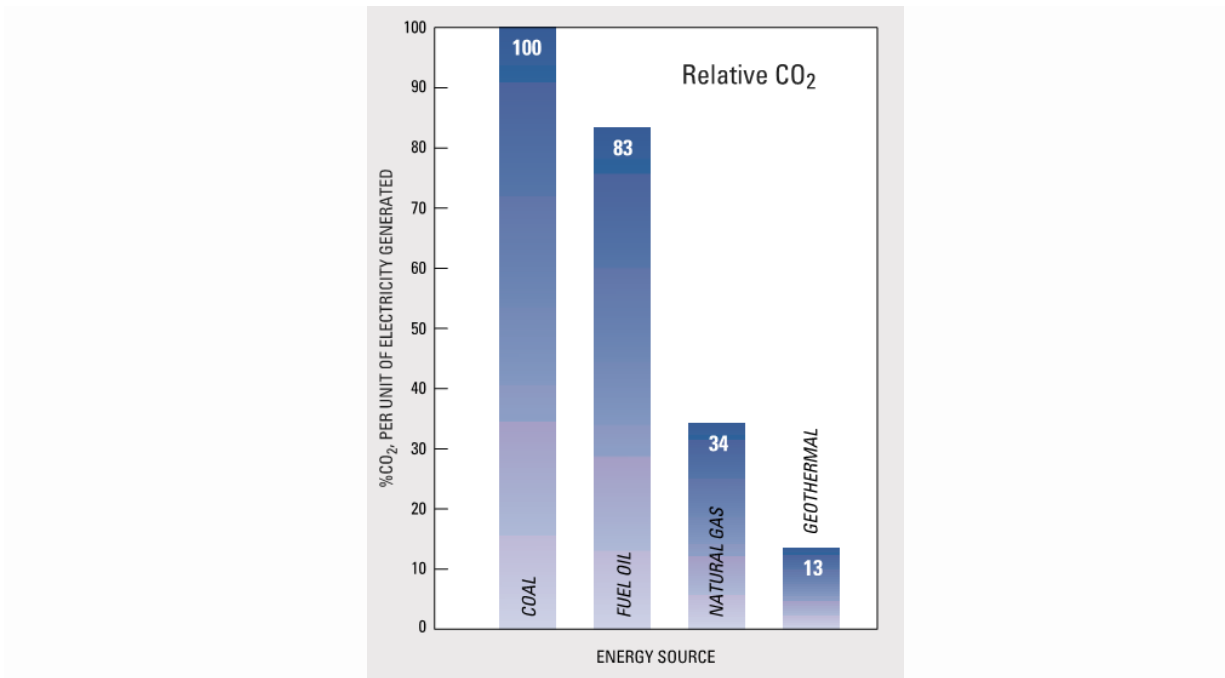
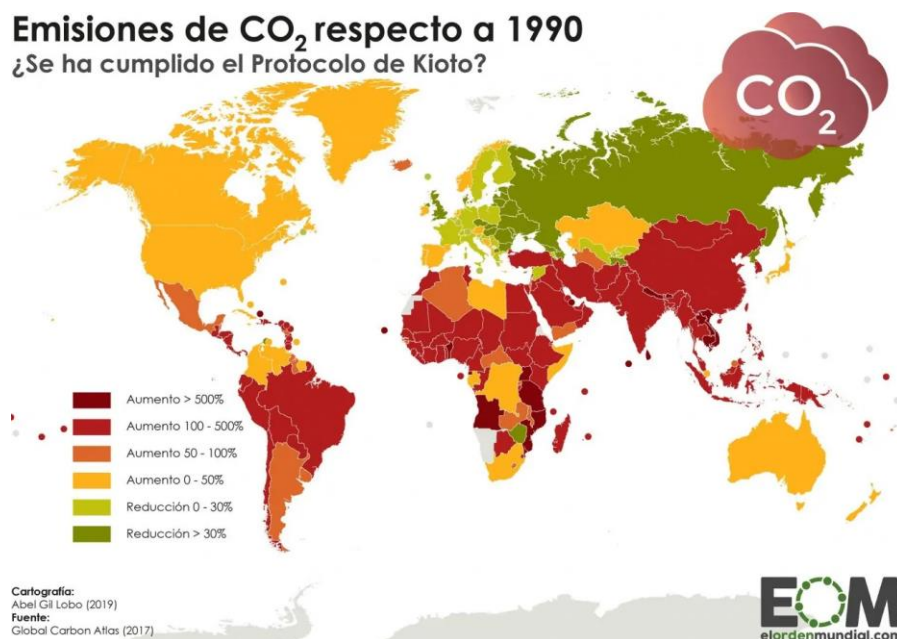


Figura 3. Diferentes fuentes de energía en Estados Unidos con alto porcentaje de fósiles. [9]



El Protocolo de Kioto, entró en vigor en febrero de 2005 y estableció por primera vez objetivos de reducción de emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) para los principales países desarrollados y economías en transición, con un calendario de cumplimiento.

Se acordó un objetivo mundial para reducir entre 2008 y 2012 al menos un 5% las emisiones totales de GEI respecto a las producidas en 1990. Sin embargo, como lo apunta Abel Gil Lobo, autor de la cartografía de “El Orden Mundial en el Siglo XXI” que se publica en 2017 y se muestra en la [Figura 4](#), las toneladas anuales de CO<sub>2</sub> emitidas por habitante, lejos de disminuir, aumentaron. Además, según la Organización Meteorológica Mundial, los indicadores empeoraron y los impactos del cambio climático se agravaron en 2020 [\[10\]](#). Por otro lado, en el contexto global, el cambio climático no es un problema equitativo, pues la población más pobre del mundo es la que menos contribuye a la acumulación de GEI y, al mismo tiempo, la peor equipada para hacer frente a sus impactos negativos.



**Figura 4.** Distribución mundial de las emisiones de GEI que muestran el no cumplimiento de los compromisos asumidos en el Protocolo de Kioto. [\[11\]](#)

Según la Agencia Internacional de Energía (AIE) los fósiles continúan manteniendo un papel predominante en la matriz energética mundial. Se prevé que pueden alcanzar más de dos tercios del incremento total de la energía primaria entre el 2007 y el 2030. En términos absolutos, el carbón supondrá el mayor incremento, seguido del gas y el petróleo. No obstante, el petróleo será el componente más destacado, pero su peso irá descendiendo paulatinamente desde el 34% actual hasta el 30% en el 2030 [\[12\]](#).

Por otro lado, no solo los delicados balances entre los componentes físicos de nuestra atmósfera, biósfera, hidrósfera y litósfera, han sido peligrosamente alterados, sino que también el funcionamiento mismo del componente biológico de los ecosistemas, y con ello una de las amenazas a más corto plazo la constituye el potencial agotamiento de las reservas mundiales de recursos energéticos no renovables como el petróleo, gas y el carbón [\[13\]](#). En la [Figura 5](#) podemos observar dicho consumo.

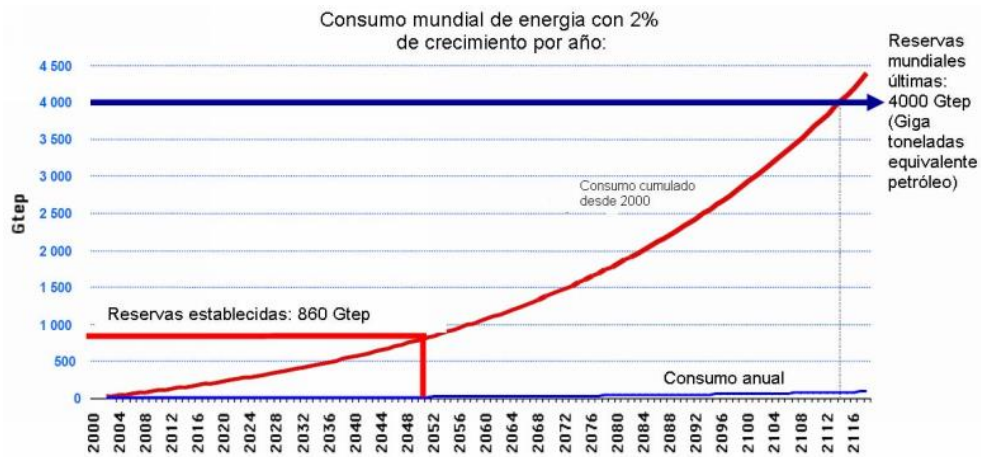


Figura 5. Proyección del consumo mundial de energía y reservas medidas en GTEP <sup>[1]</sup> entre 2000 y 2116. [14]

Es por esta razón que el uso de las energías renovables (ER), junto al Uso Racional y Eficiente de la Energía (UREE), son elementos imprescindibles para detener este proceso. Por ER, se entiende a aquellas que se renuevan a tasa inagotable en referencia al tiempo de intervención humana, es decir, existe un equilibrio controlado entre la velocidad a la que se generan en relación a la que se consumen.

*Una de ellas es la geotérmica, que aprovecha la energía interna de la tierra, y comparativamente con las otras energías alternativas, tiene la ventaja que proporciona la energía suficiente para la climatización de los hogares todos los días del año sin importar el clima exterior [15].*

Sin embargo, dada la diversidad de localizaciones y características de las edificaciones, los patrones de consumo energético varían en función de las condiciones ambientales exteriores, el tipo de actividad, el nivel de desarrollo tecnológico y la economía. Además, las variaciones en los parámetros de confort de las diferentes culturas y estamentos sociales, así como el nivel adquisitivo de los usuarios inciden sensiblemente en el consumo. En sociedades con bajo nivel de desarrollo y PBI, en muchos de los hogares el uso energético se limita a la producción de alimentos, mientras que en sociedades más desarrolladas incluye el confort higrotérmico y uso de multitud de electrodomésticos. Por ejemplo, en Estados Unidos el consumo de energía es de 11,4 kWh por persona mientras que en Bangladesh (País con menor consumo per-cápita) solo llega a 0,2 kWh por persona, 57 veces menos [12].

Figura 6 y otros fenómenos térmicos, deben haber llevado a nuestros antepasados a suponer que partes del interior de la Tierra estaban calientes. Sin embargo, no fue hasta un período comprendido entre los siglos XVI y XVII, cuando las primeras minas fueron excavadas a unos cientos de metros bajo el nivel del suelo, que el hombre dedujo, por simples sensaciones físicas, que la temperatura de la Tierra aumenta con la profundidad.

[1] Gigas Toneladas Equivalente de Petróleo.



**Figura 6.** Piscina más antigua conocida alimentada por una fuente termal, construida en la dinastía Qin en el siglo III a. C. [16]

Las cuevas garantizan una temperatura de partida habitable, a la que se suman otros métodos de control energético. Según Geothermal Communities (GEOCOM), el despliegue geotérmico futuro podría satisfacer más del 3% de la demanda mundial de electricidad y alrededor del 5% de la demanda mundial de calor para 2050 [17].

### Problema energético local

Argentina se destaca por la gran diversidad de recursos energéticos, no obstante, en su matriz energética haya presencia principal de combustibles fósiles, ya que el petróleo y el gas alcanzan casi el 90% del total de la oferta energética del país [18]. De este modo, el sistema energético es contaminante del lado de la generación y la energía se usa de manera irracional del lado del consumo.

No obstante, el Estado Argentino promueve una visión de largo plazo para los desafíos que enfrenta el sector energético, que se plasmó en el documento “*Hacia una Visión Compartida de la Transición Energética* [2] *Argentina al 2050*”, reuniendo consensos alcanzados por instituciones que trabajan en esta materia, estableciendo objetivos y metas a revisar cada 5 años [19]. Los cuatro pilares fundamentales de la transición energética contemplados en el documento anterior son: *seguridad energética; sustentabilidad ambiental; eficiencia y competencia; inclusión social y empleo.*

Aprovechando los avances tecnológicos actuales es posible buscar nuevas soluciones al consumo energético que generan los sistemas de climatización de los espacios, pensar en nuevas formas para disminuir la demanda permite mantener un equilibrio natural de los recursos. Debemos estudiar nuevas posibilidades que disminuyan el impacto ambiental y favorezcan el uso de ER, ya que, el crecimiento de la población deriva, entre otras cosas, en un mayor consumo de energía, con lo cual el agotamiento de los recursos naturales es un problema cada vez más relevante.

---

[2] Pasaje hacia sociedades soportadas en una matriz energética alimentada con fuentes renovables.

Mantener una temperatura agradable en los ambientes hace pensar sobre el sistema de climatización más apropiado y seguro para nuestra familia. Conocer el consumo y la energía que consume cada artefacto, conduce a comprar el equipo adecuado. Cada vivienda, en función del uso, requiere un sistema de climatización diferente y no todos los artefactos satisfacen nuestras necesidades. Existen múltiples opciones para crear ambientes más confortables. Las necesidades de climatización varían a lo largo del año en función del clima, por lo tanto, para optimizar el consumo energético, es necesario mantener buenas prácticas.

Para mantener una vivienda a una determinada temperatura de confort, deben estar compensados el ingreso y la pérdida de calor a través los distintos componentes de la envolvente. Las pérdidas de energía se producen en las paredes, techos, aberturas, piso, etcétera, y las renovaciones de aire son necesarias para la salubridad y confort de los habitantes [20].

Existe una importante cantidad de estudios cuyo objetivo principal es evaluar, con base en datos experimentales y modelos computacionales, el potencial de pre-acondicionamiento del aire de ventilación basado en intercambiadores de calor tierra-aire (ICTA) [21]. Esta tecnología de utilización de energía geotérmica de poca profundidad, puede reducir significativamente el consumo de energía del edificio [22].

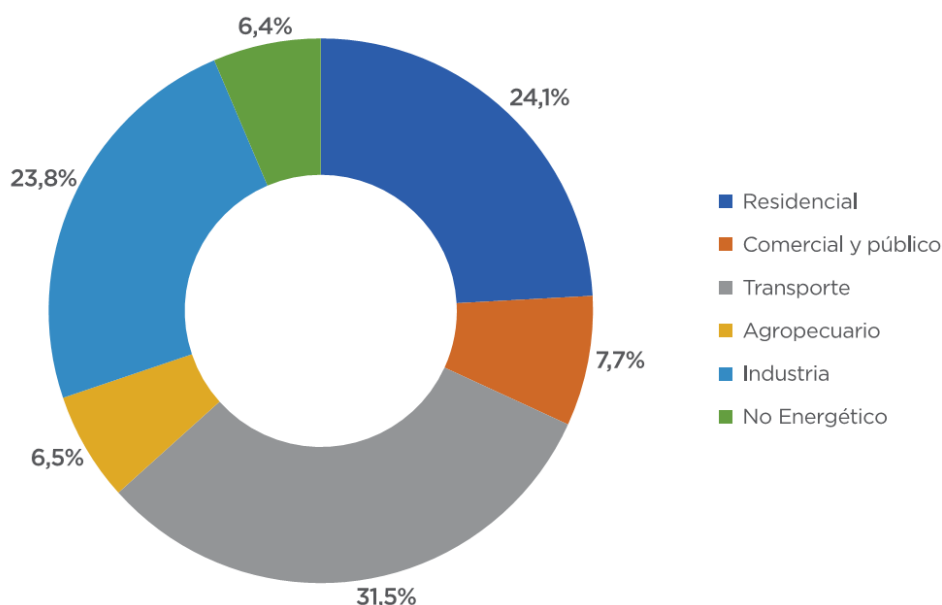
El uso de ICTA está aumentando en todo el mundo, utilizándolo principalmente para acondicionamiento de espacios, calentamiento de agua, secado agrícola, baño, natación, etc. carga de enfriamiento en verano y carga de calefacción en invierno. Conservar una cantidad significativa de energía de primera calidad y, por lo tanto, mitigar el impacto en el medio ambiente a través de reducción de emisiones [23].

Se pueden acoplar varias tecnologías de calefacción y refrigeración junto a ICTA, incluida la tecnología de captación solar térmica, la tecnología de refrigeración por evaporación, la tecnología de refrigeración por radiación nocturna, la chimenea solar, la torre eólica, etc. Estas tecnologías se utilizan para equilibrar la carga de calor o la descarga subterránea o para reducir la demanda de los edificios. El consumo de energía de los sistemas de refrigeración y calefacción se puede reducir en gran medida después de un diseño e integración adecuados de estas tecnologías [24].

### 3. MARCO DE REFERENCIA CONCEPTUAL

#### Distribución del consumo energético nacional

En Argentina aproximadamente el 31% de la energía que se consume se utiliza en el sector residencial, comercial y público. De este consumo, alrededor del 58% se usa para acondicionamiento de aire, calefacción y refrigeración. Por lo tanto, alrededor del 18% del consumo energético total del país, se emplea en acondicionamiento térmico de interiores, como se muestra en la [Figura 7 \[20\]](#).



**Figura 7.** Usos de la energía en Argentina. Se observa que un 31.8%, se encuentra en el sector transporte, seguido por el sector residencial (24.1%) e industrial (23,8%). Lo siguen en importancia el sector comercial y público (7,7%), el sector agropecuario (6,5%) y el no energético (6,4%) [25].

#### La tierra como acondicionador térmico

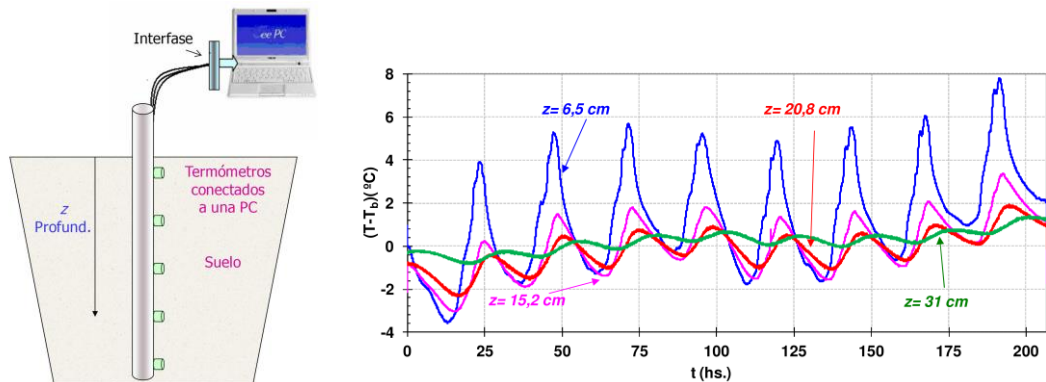
El terreno actúa como un *gran termostato*. Su baja conductividad térmica hace que la penetración del calor en el suelo sea muy lenta, al igual que su enfriamiento. Para hacer una analogía, podemos pensar en una cueva, en la cual, su interior parece “refrigerado”. Lo que ocurre es que la temperatura en el interior de la cueva es cercana a la media anual; por esta razón las cuevas parecen frescas en verano y cálidas en invierno.

Las propiedades térmicas del suelo hacen que las variaciones diurnas de la temperatura penetren hasta unos 0,5 m. Más allá de estas profundidades, la temperatura de la tierra se mantiene prácticamente constante todo el año. El valor de esta temperatura es generalmente igual al valor medio de la temperatura anual en la superficie.

*En el caso de la zona central y norte de Argentina, a unos pocos metros de la superficie, la temperatura del suelo es muy estable todo el año y próxima a unos 19° (±2°), la cual está*

dentro de la zona de confort térmico. Debido a su alta capacidad calorífica y baja conductividad térmica, la tierra se comporta como un gran colector y acumulador de energía.

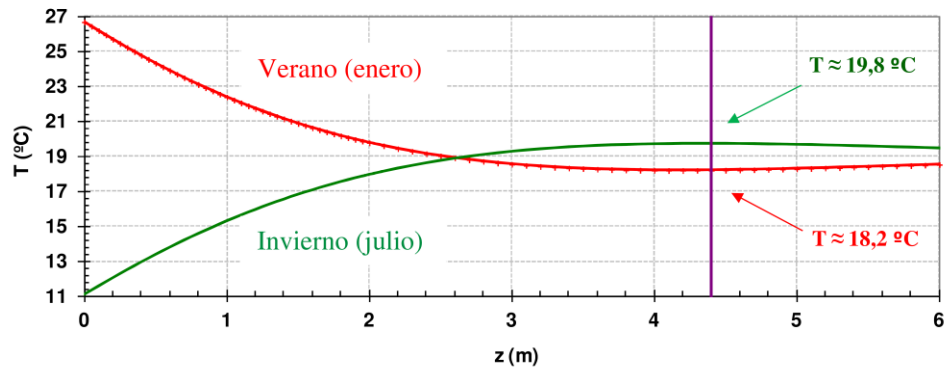
Leila Mora Iannelli, como parte de su trabajo de Tesis de Licenciatura en Análisis Ambiental "Acondicionamiento Térmico de Aire mediante el uso de Energía Geotérmica", realizó el estudio de ondas de calor en el suelo [26]. En el arreglo experimental que se muestra esquemáticamente en la **Figura 8 (a)**, utilizó una sonda de plástico de 35 cm de longitud, en la que se realizaron cinco perforaciones equiespaciadas a lo largo del eje z, eje vertical, en las cuales se introdujeron los sensores térmicos. Éstos fueron conectados a una computadora personal, usando un convertidor analógico-digital que convierte la señal analógica que da el sensor en una señal digital para procesar los datos y posteriormente analizarlos.



**Figura 8. (a)** izq. Esquema del arreglo experimental para medir las ondas térmicas del suelo a diversas profundidades. **(b)** der. Variación de la temperatura a distintas profundidades de la sonda como función del tiempo. Los valores máximos y mínimos para los distintos termómetros se alcanzan en distintos tiempos.

Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 8 (b)**, y se enumeran a continuación:

- Se observa que el calor se propaga en forma de ondas, con amplitudes decrecientes.
- El termómetro que se encuentra más cerca de la superficie de la tierra (curva azul) tiene mayor amplitud que aquellos que están más alejados.
- Las ondas de calor se propagan con una velocidad finita a través del suelo. Para las ondas anuales, verano-invierno, su velocidad es tal, que ellas demoran unos 6 meses en recorrer un par de metros.
- La amplitud de la onda térmica se va atenuando a medida que aumenta la profundidad.
- A una profundidad del orden de 2m, se produce una inversión de temperatura.
- En verano, a esta profundidad, encontramos el terreno más frío que su valor medio anual y viceversa, en inviernos esta zona del suelo está más caliente. De modo que esta región de suelo se convierte en un lugar óptimo para colocar un intercambiador térmico con el interior de las viviendas, que podría usarse por sí mismo, o acompañado de una ventilación mecánica controlada.



**Figura 9.** Variación de la temperatura del suelo para distintas profundidades en las adyacencias de la ciudad de Buenos Aires, en verano (curva roja) y en invierno (curva verde), mientras que la línea vertical violeta representa la posición de los puntos de inversión de las temperaturas [27].

A partir del ajuste adecuado de datos experimentales suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional, se hizo un análisis de las temperaturas a diferentes profundidades del suelo en verano (enero) y en invierno (julio), mediante un modelo teórico. Desde luego, estas propiedades pueden variar de un lugar a otro dependiendo de las propiedades del suelo, pero en general tienen un perfil similar al que se muestra en la Figura 9 y a una profundidad de 4 m, la temperatura se mantiene constante, cercana a la de confort. A esa profundidad se genera una inversión térmica, donde la temperatura es más alta que el promedio de temperatura ambiente en invierno y más baja que el promedio de temperatura ambiente en verano. Por consiguiente, esta sería la profundidad óptima para el intercambio térmico para Buenos Aires, aunque es claro que si nos situamos a una profundidad de 2 m ya pueden lograrse efectos similares [27].

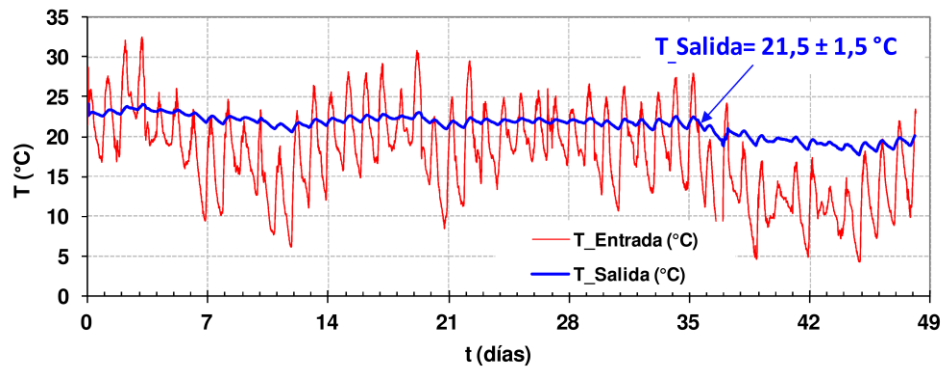
### Sistema Intercambio de Calor Tierra – Aire (ICTA)

Se realizó un estudio de campo utilizando un tubo de PVC especial (polietileno de alta densidad o polietileno reticulado (PE-X), de 75 m de longitud, 20 cm de diámetro y 8 mm de espesor, instalado en forma horizontal y zigzag, enterrado a una profundidad de 2 m.

Se midió la velocidad de flujo del aire dentro del tubo del intercambiador de calor aire-tierra mediante un anemómetro en la entrada del tubo, dado que es despreciable la pérdida de carga, la velocidad del aire de salida tiene una variación despreciable respecto a la entrada. Se tomó la temperatura del aire a la entrada del tubo en intervalos de 15 minutos con un registrador de datos. Se realizó además una perforación en la salida del tubo, en la cual se introdujo otro registrador de datos de las mismas características y se fijó al tubo de salida para lograr un buen contacto térmico. Se registraron las temperaturas del aire a la entrada y a la salida del tubo a lo largo de varias semanas.

Las velocidades del aire dentro del tubo del intercambiador geotérmico aire-tierra se mantuvieron entre 3 y 5 m/s. La Figura 10 muestra las temperaturas del aire a la entrada y a la salida del tubo en función de los días, desde el 16 de marzo de 2012 hasta el 4 de mayo del mismo año. En el gráfico se pueden observar dos curvas: la de color rojo representa las

temperaturas del aire a la entrada del tubo y la de color azul representa las temperaturas del aire a la salida del mismo.



**Figura 10.** Variación de la temperatura en la entrada y salida del tubo en función de los días de medición. Temperaturas de entrada del aire al tubo (curva roja) y a la salida del mismo (curva azul), preconditionado. Los registros térmicos se obtuvieron a lo largo de 49 días desde el día 16 de marzo de 2012 hasta el 4 de mayo del mismo año. Se observa que la temperatura de salida del tubo oscila entre 20 °C y 23 °C, rango de temperatura de confort.

### Acondicionamiento térmico y consumo de energía en viviendas

Haciendo circular aire a través de tubos enterrados, antes de llegar al interior de los edificios y viviendas, podemos utilizar las propiedades descritas de la tierra como sistema de acondicionamiento térmico natural del aire, con el consecuente ahorro de energía y disminución de emisiones de GEI.

Sin embargo, para que este esquema de acondicionamiento de aire sea adecuado para una vivienda, es necesario que se minimicen las pérdidas de calor en las paredes y en los techos. Es decir, la vivienda debe tener condiciones de aislación térmica adecuada. Los materiales de construcción modernos y las normas vigentes permiten lograr este objetivo sin grandes gastos, sobre todo en viviendas nuevas. En Tabla se comparan viviendas, Tipo H (con poca aislación térmica) y Tipo C (con mejor aislación térmica), sin tubos y con tubos enterrados, con los porcentajes de pérdidas en sus distintos componentes. Estos valores son aproximados y sirven para tener idea de los órdenes de magnitud involucrados en estas pérdidas.

Vivienda	Comentario	Calefacción [kWh/año]	Refrigeración [kWh/año]	Total [kWh/año]	Ahorro %
Tipo H (sin tubos)	Poca aislación térmica	9.958	2.628	12.586	0%
Tipo H (con tubos)	Poca aislación térmica	8.484	2.239	10.723	15%
Tipo C (sin tubos)	Buena aislación	5.020	1.325	6.345	50%
Tipo C (con tubos)	Buena aislación	3.546	936	4.482	64%

**Tabla 0.** Consumos de energía para calefacción y refrigeración de cuatro tipos de viviendas consideradas esquemáticamente.

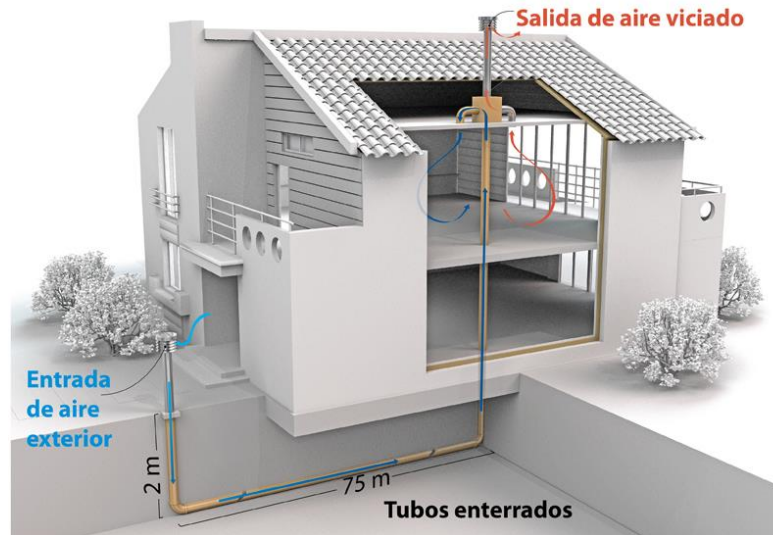
Lo significativo de esta Tabla es que el aporte de tubos enterrados a una vivienda con poca aislación sería muy modesto (15%) y quizás no compensara su costo de instalación.



En cambio, en una vivienda con una aislación térmica mejor (Tipo C), los ahorros de energía, respecto de la misma vivienda (Tipo H) tomada como referencia, son muy significativos, del orden del 64%.

En síntesis, los tubos enterrados deben combinarse con una vivienda con buena aislación térmica de su envolvente [27].

Un ejemplo de su utilización se ilustra esquemáticamente en la [Figura 11](#).



**Figura 11.** Esquema de vivienda con tubos enterrados para el acondicionamiento térmico de ambientes utilizando la energía de la tierra como intercambiador de calor. Es necesaria una adecuada aislación térmica de la vivienda. Aplicación: Casa E (Ver [Figura 17](#), página 20) [27].

### Componentes del sistema ICTA

Existen una serie de elementos comunes en todas las disposiciones de tubos enterrados. Cada uno de estos componentes podría cambiar según la situación climática y la necesidad del proyecto, pero los básicos son: *torre de aspiración*, *colector*, *conductos*, *drenaje*, *sistema mecánico de impulsión*, *distribución* y *extracción*.

La [Figura 12](#) muestra esquemáticamente estos componentes y su ubicación:

1. Elemento de aspiración para una admisión higiénica de aire.
2. Sistema de tubos de pared maciza.
3. Evacuación de condensados.
4. Acometida de la vivienda.

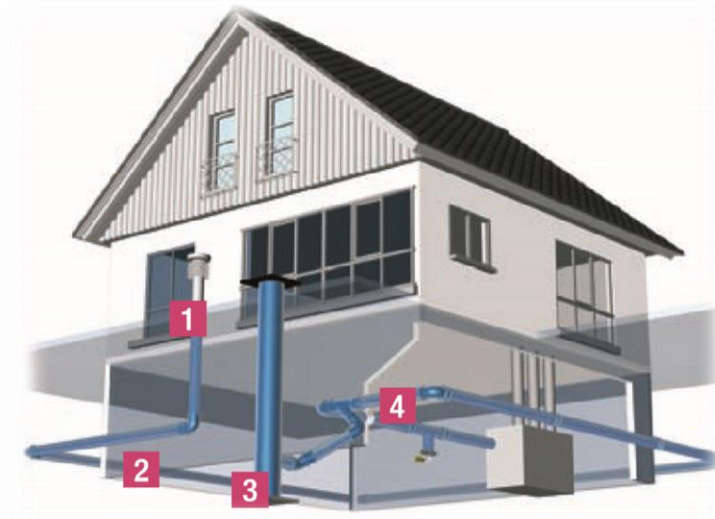


Figura 12. Muestra esquemática de componentes del ICTA y su ubicación. [28]

### Estimación del factor de ahorro de energía en el acondicionamiento térmico

El modelo propuesto para estimar el factor de ahorro de energía en el acondicionamiento térmico consiste en lograr que una vivienda de volumen  $V_0$  se mantenga a una temperatura de confort, determinada por dos temperaturas de referencia:  $T_{m\acute{a}x}$  y  $T_{m\acute{i}n}$ . El objetivo de este sistema de acondicionamiento térmico consiste en disminuir a  $T_{m\acute{a}x}$  la temperatura del aire si está arriba de  $T_{m\acute{a}x}$  (déficit grado día de refrigeración, DGD\_R) y elevar a  $T_{m\acute{i}n}$  la temperatura del aire si está por debajo de  $T_{m\acute{i}n}$  (déficit grado día de calefacción, DGD\_C). Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 13.

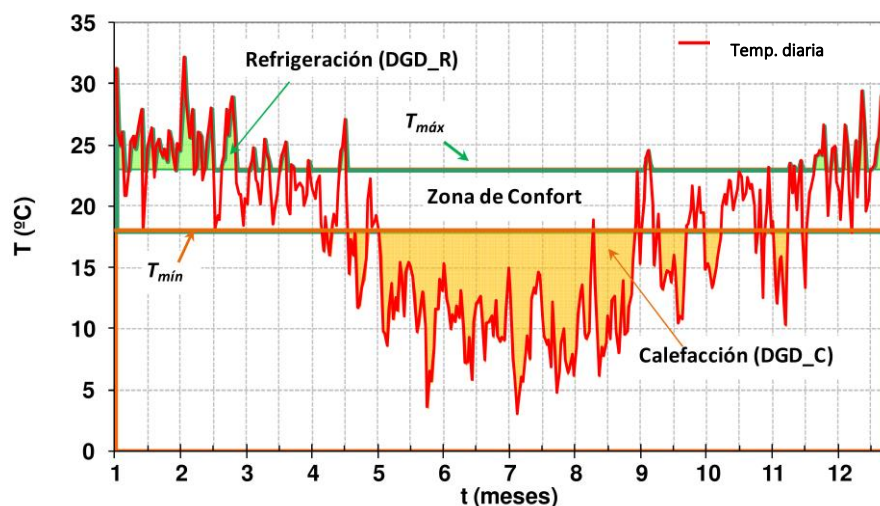


Figura 13. Temperatura diaria a lo largo de un año, curva roja. Las líneas horizontales  $T_{m\acute{a}x}$  y  $T_{m\acute{i}n}$  delimitan la zona de confort. El área sombreada verde indica el valor del déficit grado día de refrigeración (DGD\_R). El área sombreada naranja indica el valor del déficit grado día de calefacción (DGD\_C). [29].

El déficit grado día de refrigeración (DGD\_R) se puede estimar como:

$$DGD\_R = \sum_{\text{año}} |(T_m(t) - T_{m\acute{a}x})|_{T(t) > T_{m\acute{a}x}} \quad (1)$$

donde  $T_m(t)$  es la temperatura media diaria estimada,  $T_{m\acute{a}x}$  es la temperatura máxima de referencia de la zona de confort y se realiza la suma sobre todos los días del año para los cuales  $T_m(t) > T_{m\acute{a}x}$ . El DGD\_R viene dado por el área sombreada verde de la [Figura 13](#).

Análogamente, el déficit grado día de calefacción (DGD\_C) se puede estimar como:

$$DGD\_C = \sum_{\text{año}} |(T_{m\acute{i}n}(t) - T_m)|_{T(t) < T_{m\acute{i}n}} \quad (2)$$

donde  $T_m(t)$  es la temperatura media diaria estimada,  $T_{m\acute{i}n}$  es la temperatura mínima de referencia de la zona de confort y se realiza la suma sobre todos los días del año para los cuales  $T_m(t) < T_{m\acute{i}n}$ . El DGD\_C viene dado por el área sombreada naranja de la [Figura 13](#).

### Ejemplo de cálculo y diseño para caso de estudio local.

El trabajo realizado por Carro Pérez et al. [30] tiene como objetivo poner de manifiesto la utilización de la energía geotérmica de baja entalpía como una opción económica y ecológicamente amigable para la colaboración en la climatización de ambientes.

Se realizan los cálculos y diseño en base a las características térmicas de los parámetros intervinientes, tanto del suelo y clima local como de los materiales de la envolvente de la construcción. Se determinó, mediante balances térmicos realizados sobre un software libre BT6 creado por Dilasoft, el análisis energético y económico que produce la aplicación del sistema de geotermia de baja entalpía.

Como parte de este estudio, consideraron la variación de la longitud del tubo manteniendo constante la temperatura del aire a la entrada, asumiendo una temperatura igual a la media máxima de verano y de invierno, para condiciones del suelo loésico (conductividad del suelo local de 0.80 W/mK), a fin de estimar la variación en la longitud de la instalación en función de la temperatura del aire a la salida del tubo, como se muestra en la [Figura 14](#), en condiciones de verano e invierno, respectivamente.

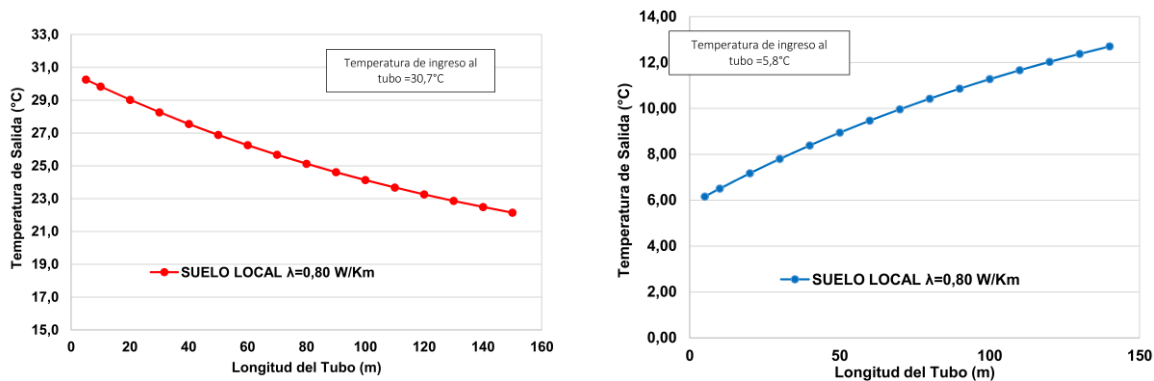


Figura 14. Temperatura vs. Longitud del Tubo en condiciones de verano (izq.) e invierno (der.) respectivamente. (Temperatura de ingreso constante)

Se observa que, para lograr una mayor disminución de temperatura en verano o mayor aumento en invierno, se necesita una longitud mayor considerando siempre la misma velocidad de aire, 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 del 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 despreciablemente en la temperatura de salida del aire, por lo que se hace poco conveniente económicamente.

El trabajo concluye que la implementación de este tipo de sistema presenta una solución económica y energéticamente eficiente y que, para utilizar energía geotérmica de baja entalpía por medio de un sistema de tubos enterrados en cualquier lugar del mundo, solo hay que conocer algunas características del lugar de emplazamiento y del suelo.

### Simulación de Ductos con SIMEDIF

En esta sección se describe el programa de uso libre creado en el Instituto de Energías No Convencionales de la UNSa, INENCO SIMEDIF 2.0 – CÁLCULO TÉRMICO DE EDIFICIOS [31], diseñado para calcular la temperatura horaria en los ambientes interiores de un edificio, la temperatura de las superficies de las paredes y la energía auxiliar de calefacción/refrigeración que se necesita para mantener los espacios a una dada temperatura y el nivel de confort térmico según ASHRAE 55. Permite analizar su comportamiento frente a diferentes condiciones climáticas, detectar problemas de falta de confort (sobrecalentamiento o bajas temperaturas), evaluar las distintas alternativas constructivas durante la etapa de diseño, como por ejemplo variaciones en la geometría del mismo, orientación, ubicación y tamaño de áreas vidriadas, estructura y conformación de la envolvente, materiales y sistemas de acondicionamiento pasivos e híbridos a utilizar, etc.

El software incorpora un nuevo módulo para simular intercambiadores tierra-aire basado en el modelo validado que utiliza un desarrollo en serie de Fourier para representar la

distribución de temperatura del suelo. El diseño de estos sistemas involucra la optimización de sus características geométricas (flujo de aire, profundidad de los ductos, longitud de los mismos, etc.) [32].

El modelo SIMEDIF se basa en las siguientes hipótesis:

- 1) El suelo se considera como un material de composición homogénea, con propiedades térmicas constantes en todo el periodo de simulación (no considera variaciones de las propiedades térmicas con la temperatura, ni con el contenido de humedad del suelo).
- 2) La distribución de temperatura del suelo no sufre grandes perturbaciones debido a la presencia del ducto (el suelo es considerado como fuente o sumidero de calor). El modelo no considera acumulación estacional.
- 3) La temperatura superficial del suelo tiene forma senoidal y se caracteriza mediante tres variables conocidas: la temperatura media anual superficial  $T_m$  (°C), la amplitud superficial  $A_s$  (°C) y el desfase  $t_0$  (días), que es el día del año en que ocurre el mínimo de temperatura superficial. La Figura 15 muestra un ejemplo.

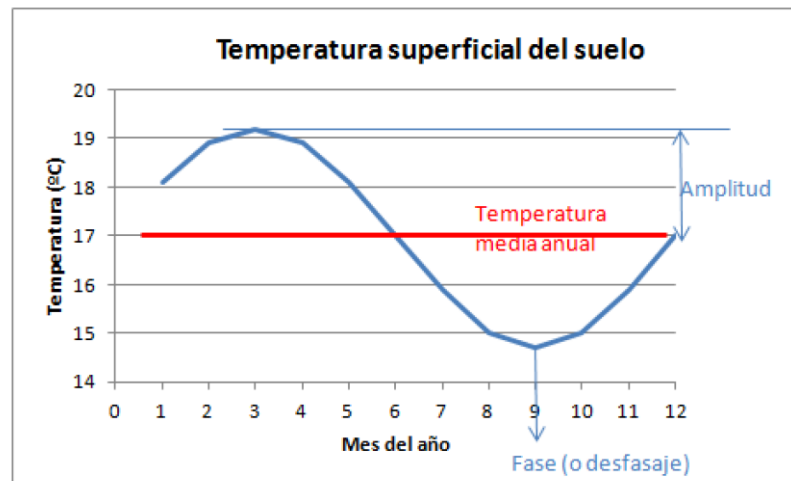


Figura 15. Ejemplo de temperatura superficial del suelo a lo largo del año. En este caso  $T_m = 17^\circ\text{C}$ ;  $A_s = 2.1^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = 243$  días.

En base a estas hipótesis, existe una solución analítica que permite encontrar la temperatura de la tierra a cualquier profundidad y para cualquier día del año:

$$T_{\text{terreno}}(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[ \frac{2\pi}{365} \left( t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (3)$$

$\alpha$  es la difusividad térmica del suelo y se expresa en  $[\text{m}^2/\text{s}]$  y  $t$  y  $t_0$  se miden en [días].

En SIMEDIF la temperatura del aire se calcula en base a una discretización temporal y espacial a lo largo del ducto, utilizando como condición de borde la temperatura del terreno.

## Propiedades térmicas del suelo

Algunos de los valores más usuales para la difusividad térmica de acuerdo al tipo de suelo se encuentran en la [Tabla 1](#).

Propiedades térmicas del suelo				
Tipo de suelo	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [kJ/m <sup>3</sup> K]	$\lambda$ [W/mK]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]
Húmedo	1870	1260	2.4	1.02 x 10 <sup>-6</sup>
Rocoso	2800	840	2.4	1.02 x 10 <sup>-6</sup>
Húmedo y Compacto	2100	960	1.3	0.64 x 10 <sup>-6</sup>
Seco y Compacto	2000	840	0.87	0.52 x 10 <sup>-6</sup>
Húmedo y Liviano	1600	1050	0.87	0.52 x 10 <sup>-6</sup>
Seco y Liviano	1440	840	0.35	0.29 x 10 <sup>-6</sup>

**Tabla 1.** Valores orientativos de la conductividad  $\lambda$  y difusividad térmica  $\alpha$  para distintos tipos de suelo, tomado de [\[33\]](#).

El ingreso de datos consta de cuatro partes: los datos de los conductos, del suelo, del aire de entrada y los parámetros de la simulación. El software se encarga de realizar el cálculo y entregar los resultados en un archivo de extensión “.trv”. El módulo puede utilizarse independientemente, sin necesidad de conectar los conductos a ningún local. La [Figura 16](#) muestra un ejemplo de ingreso de datos en la pantalla principal.

Conductos enterrados (puede usarse como módulo independiente)

Datos del canal rectangular	
Profundidad (m)	1
Ancho del conducto (m)	0.2
Alto del conducto (m)	0.4
Longitud del conducto (m)	15
Zona térmica conectada al conducto	

Datos del aire en el conducto	
Temperatura de entrada del aire (°C)	20
Velocidad de entrada del aire (m/s)	2.2
Definir propiedades del aire	

Propiedades del suelo	
Conductividad térmica (W/m°C)	0.87
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2000
Cp (J/kg°C)	840

Temperatura superficial del suelo	
Temperatura media anual en la superficie del suelo (°C):	23.6
Amplitud térmica sobre la superficie del suelo (°C)	10.2
Desfasaje de la temperatura superficial (día en que ocurre el mínimo, 1 a 365):	154

Datos para la simulación	
Tamaño de la grilla (m):	0.01
Período de simulación (1 a 365):	
<input checked="" type="radio"/> Un único día	1

**Progreso de la simulación**

Figura 16. Pantalla principal del módulo de intercambiadores tierra-aire, cargado con los datos por defecto.

## 4. ANTECEDENTES

### La Casa E

El primer antecedente que se expone aquí, implica el estudio de la propagación de ondas de calor en el suelo, mencionado en la sección anterior. Se concretó con tubos enterrados en una casa real (BASF, Tortuguitas, Provincia de Buenos Aires). La *Casa E* se terminó de construir en mayo de 2010 siguiendo pautas europeas con base a 3 pilares fundamentales: eficiencia energética, materiales de alto rendimiento y diseño-decoración. Esta construcción promueve el ahorro de consumo de energía y desarrolla soluciones de vanguardia sobre el uso racional de la energía, lo que implica: protección del clima, conservación de los recursos y ventajas económicas. La **Figura 17** muestra el *render* de la *Casa E*.



**Figura 17.** *Render* de la *Casa E* en Tortuguitas, Buenos Aires. El intercambiador de calor aire-tierra que aprovecha el hecho de que la temperatura del suelo, a unos pocos metros de profundidad, se mantiene relativamente constante durante todo el año [34].

En este caso las condiciones técnicas fueron las siguientes: el tubo tenía 20 cm de diámetro y 75 m de longitud y estaba ubicado a 2 m de profundidad. El flujo de aire fue de aproximadamente 550 m<sup>3</sup>/h, suficiente para lograr 3,3 renovaciones del aire por hora en la vivienda de 65 m<sup>2</sup>.

Se observó que la temperatura de salida se mantuvo casi constante, aun en períodos en los que la temperatura ambiente estuvo todo el día por debajo del valor medio. La temperatura de salida del aire siempre se mantuvo entre 20 °C y 23 °C, que como se mencionó, es un rango de temperatura de confort.

A partir de los datos medidos de temperaturas desde el día 16 de marzo de 2012 hasta el día 23 de noviembre del mismo año a la entrada y a la salida del tubo enterrado en la *CasaE* se calculó el DGD\_R, DGD\_C, y de la suma de ambos se obtuvo el DGDtotal, como pueden observarse en la **Tabla 2**.



	Exterior	Con Tubos	Factor de Ahorro
DGD_R	56	5,5	90%
DGD_C	1002	332	67%
DGD <sub>total</sub>	1058	338	68%

**Tabla 2.** DGD\_R, DGD\_C y DGD<sub>total</sub> para la *Casa E*. Tomando como base las temperaturas del aire exterior y las temperaturas del aire luego de recorrer los tubos enterrados.

### Geotermia para climatización por aire en conjuntos de viviendas sociales en Bariloche

El segundo antecedente realizado por el Foro de Viviendas Sustentables y Energías FOVISEE [35], en conjunto con la Embajada de Alemania y la Municipalidad de Bariloche en el año 2018, tuvo como objetivo la instalación de un sistema de climatización por geotermia, aplicado a un conjunto de 4 viviendas sociales, en el barrio El Alto de la ciudad de Bariloche que se muestra en la **Figura 18**.



**Figura 18.** Imagen de las casas climatizadas por geotermia en el barrio El Alto de la ciudad de Bariloche. [36]

El sistema funciona a través de conductos enterrados bajo tierra que hacen circular el aire horizontalmente, permitiendo que tome la temperatura de la tierra, la cual es constante, para ingresarlo a las viviendas y climatizarlas tanto en invierno como en verano. El esquema de este diseño que se instaló entre 2 a 3.5 m de profundidad, se muestra en la **Figura 19**.



Figura 19. Esquema de instalación de geotermia en el barrio El Alto de Bariloche.

Las Figuras 20 y 21 muestran la sala de máquinas que contiene el impulsor principal, desde donde se distribuye el aire climatizado y purificado hacia las 4 viviendas, que utilizan el sistema de manera independiente mediante impulsores independientes.

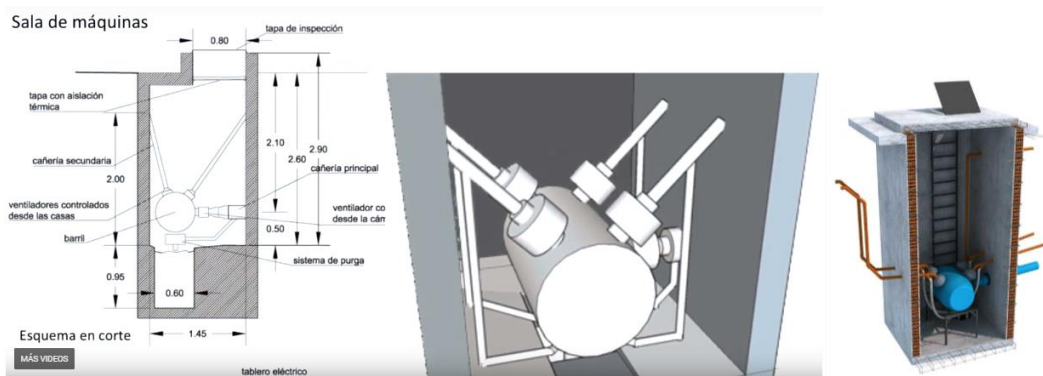


Figura 20. Sala de máquinas donde llega el aire que es forzado por el impulsor principal

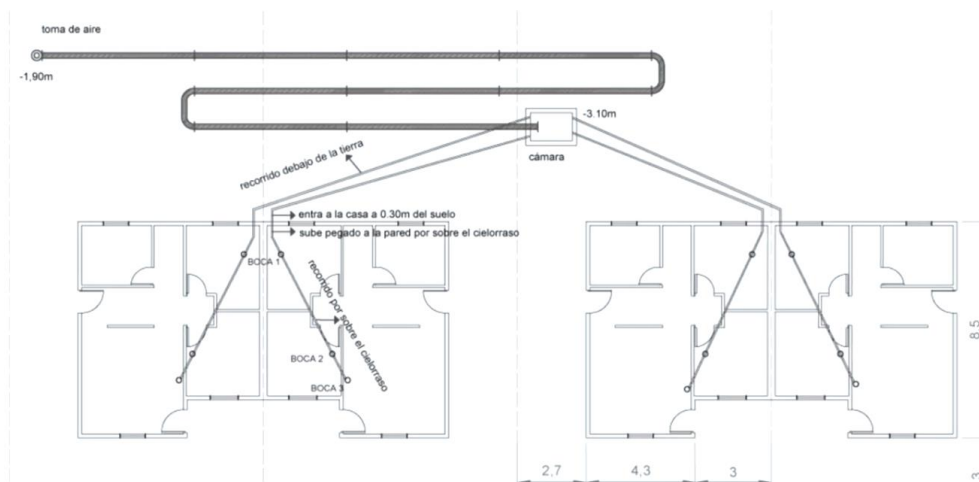


Figura 21. Esquema de distribución interior del aire climatizado y purificado dentro de las viviendas por 4 impulsores independientes

## Geotermia en el Complejo Chateau Harmonie

El tercer antecedente es el emprendimiento de Grupo Canter Chateau Harmonie, ubicado en el barrio Chateau Carreras, cuya construcción comenzó en 2018 y representará un hito en construcción bioclimática en Córdoba. A través del uso de energía geotérmica, sus departamentos ahorrarán una importante cantidad de energía, en comparación con un diseño de construcción y climatización tradicionales. En el subsuelo de cada torre del condominio se colocarán bombas de calor, de las cuales bajarán sondas a 50 metros de profundidad en busca de calor. A través de un estudio llevado a cabo por la Fundación Nova Vektors ([www.novavektors.com](http://www.novavektors.com)) para este proyecto, se estimó el consumo energético y se propusieron una serie de recursos innovadores que dispondrá el emprendimiento una vez terminado, mediante simulaciones basadas en modelos computacionales, matemáticos y estadísticos. Como resultado se comprueba que con el uso de este sistema renovable los departamentos ahorrarán 71% de energía. La **Figura 22** muestra la distribución de las torres y otras dependencias del emprendimiento.



**Figura 22.** Distribución de las torres y otras dependencias del emprendimiento Chateau Harmonie. [37]

## Uso del suelo como termalizador del aire

Las instalaciones de geotermia reducen de forma muy considerable el consumo en calefacción, agua caliente sanitaria y/o refrigeración debido a su elevado rendimiento. Las bombas de calor geotérmicas aprovechan la temperatura estable del terreno para proporcionar calefacción en invierno, refrigeración en verano y agua caliente durante todo el año con los máximos niveles de eficiencia y confort. La **Figura 23** muestra el proceso de implementación de las sondas geotérmicas.



**Figura 23.** Proceso de implementación de las sondas geotérmicas en el Complejo Chateau Harmonie.

### Agua caliente a partir de sistema geotérmico

Cada litro de agua caliente consumida provendrá del excedente de las bombas de calor ubicadas en sala de máquinas en subsuelo. Lo cual permitirá minimizar el consumo global de cada edificio.

En el caso puntual de los tubos enterrados, un factor clave es el impacto urbano y visual que se contrapone con los equipos de Aire Acondicionado que encontramos en los techos de los edificios, en espacios exteriores y a la vista de todos, como es el caso también de las torres de enfriamiento (sin mencionar el enorme costo de las mismas). En el caso de los tubos, al estar todo el sistema bajo tierra, se elimina completamente este problema.

Otra ventaja frente a las torres de enfriamiento es la posibilidad de la disminución del ruido, la eliminación del riesgo de propagar la legionella <sup>[3]</sup>, bajos costos de mantenimiento, correcto funcionamiento tanto en verano como en invierno y la eliminación de aporte adicional de agua potable al sistema, factor que en las torres de enfriamiento es necesario ya que posee muchas pérdidas de agua por arrastre o evaporación, en el sistema geotérmico esto no ocurre [38].

Para seleccionar el material adecuado para dichas tuberías, quizás la mejor conductividad de calor conocida sea la de materiales metálicos, pero, dado los problemas de corrosión que presentarían los metales, se emplean materiales derivados de la familia de los propilenos, que combinan una buena conducción de calor y una excelente flexibilidad para su instalación [39].

---

[3] Legionella son un tipo de bacteria que vive en aguas estancadas con una amplia gama de temperaturas, preferiblemente superior a 35 °C. Su crecimiento se ve favorecido por la presencia de materia orgánica.

Una de las variables del sistema es la instalación de tubos verticales, que pueden aprovechar las fundaciones profundas, para usar los pilotes como sondas geotérmicas. En este caso estaríamos hablando de fundaciones geotérmicas, que reciben toda una red de tubos de polietileno, polipropileno o PVC los cuales son conectados luego a una bomba de calor (como en el caso del Complejo Chateau Harmonie). En cada pilote se sujetan los tubos de la armadura del mismo, pudiéndose insertar varios tubos que convergen en superficie a un colector común. El gran inconveniente que tiene este sistema, es que, ante una eventual pérdida o daño de algún tubo, se hace imposible repararlo, por lo cual se suele sobredimensionarlos [40].

## 5. FORMULACIÓN DE PREGUNTA – HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

### Pregunta

Se necesita repensar la forma de climatizar el sector residencial. A través de la energía geotérmica encontramos un camino más eficiente desde puntos de vista ecológico, económico, y sostenible en comparación a las energías tradicionales, como se expresó en la sección de antecedentes. Con el sistema Intercambiador de Calor Tierra - Aire, es posible obtener un importante ahorro energético, como se indica en la [Tabla 2](#). Además, la energía geotérmica es renovable, de bajo costo, existe en todo el mundo y reduce las emisiones de GEI. Esto conlleva a la pregunta:

*¿Un sistema Intercambiador de Calor Tierra - Aire, sería una alternativa viable para la climatización en el sector residencial en Córdoba?*

### Hipótesis

*"La climatización de un edificio utilizando energía geotérmica somera en la Ciudad de Córdoba, se puede realizar mediante un sistema de conductos horizontales, con bajo nivel de ruidos, bajo consumo energético y bajo impacto ambiental y visual"*

La energía geotérmica puede responder a una adecuada climatización residencial con un consumo racional de la energía en Córdoba, reduciendo las demandas actuales. Mediante el diseño del edificio, se debe apuntar a una resolución que prevea funciones acordes a su concepción como por ejemplo actividades en el subsuelo (tales como guardacoches, vinotecas, auditorio, cine, etc.) y de esa forma se justifique el trabajo geotérmico.

Habiendo expuesto anteriormente las distintas alternativas para aprovechar el calor interno de la tierra, nos enfocaremos en las aplicaciones geotérmicas de muy baja temperatura o baja entalpia, las cuales son las que se aprovechan para un consumo residencial, y no para generación eléctrica.

### Objetivo general

*"Disminuir el impacto ambiental del sector residencial, aplicando energías renovables en la Provincia de Córdoba."*

### Objetivos particulares

1. Reconocer casos de aplicación con energía geotérmica en clima templado cálido.
2. Indagar las fortalezas y debilidades de la geotermia somera.
3. Generar recomendaciones para intervenir con geotermia somera en una vivienda local.
4. Proponer, evaluar y diseñar un proyecto local concreto.

## 6. METODOLOGÍA

### Materiales y Métodos

La metodología de trabajo, se basó en la revisión bibliográfica del desempeño energético de viviendas en aquellos lugares que tengan condiciones climáticas semejantes a Córdoba. Se tomaron de referencia datos cuantitativos y cualitativos como tablas, mediciones, gráficos, relevamientos físicos, mapas, experiencias científicas probadas por organismos internacionales.

Con la finalidad de entender con claridad los fenómenos físicos involucrados en el funcionamiento del ICTA, se aplicó una metodología analítica de dimensionamiento del conducto, tomada del trabajo de S. M. Díaz, “El terreno como intercambiador”. *Enfriamiento pasivo aplicado a un edificio de nueva planta* [41], para aplicarla a un “*caso de estudio*”.

Se utilizó el software SIMEDIF 2.0 – CÁLCULO TÉRMICO DE EDIFICIOS para la simulación del comportamiento del ducto, haciendo sinergia con el método analítico citado, ya que el software está basado en el mismo desarrollo conceptual y de esta manera es posible corroborar los resultados analíticos obtenidos con el método aplicado.

### Plan de actividades y cronograma

Durante la primera etapa se plantea relevar e indagar antecedentes de energía geotérmica somera en el país, aplicados en otras zonas con climas similares al caso de estudio. Mediante investigación de la documentación comprender el funcionamiento y concepto de la geotermia. A través de consulta multimedia perfilar una propuesta para implementación de geotermia somera en la provincia de Córdoba, que pueda sostenerse mediante cálculos que validen los resultados. Finalmente, desarrollar una discusión y ofrecer una conclusión sobre los resultados de la investigación y el planteo de un caso local.

### Recursos previstos

Los recursos utilizados fueron documentos digitales de plataformas y entidades mundiales relacionadas a la energía, desde organismos públicos como privados, charlas y seminarios sobre geotermia. A partir de ello se pudieron obtener datos cuantitativos que sustentan los fundamentos del trabajo.

## 7. CASO DE ESTUDIO

### Descripción del Proyecto: Viviendas Duplex

Ubicación: Barrio Costas de Manantiales, Ciudad de Córdoba, Argentina.

Autor: AR Arquitectos.

Año: 2021

Superficie Construida: 360 m<sup>2</sup>.

En este proyecto se planteó la climatización de las viviendas mediante el empleo de un sistema intercambiador de calor tierra – aire (ICTA) en anillo, debido a que se utiliza un único conducto, a una profundidad entre 2 y 3 metros para climatizar la planta baja.

El material del conducto es PVC especial (polietileno de alta densidad o polietileno reticulado (PE-X), de 16 cm de diámetro y de 3.9 mm de espesor de pared del tubo. A lo largo de un recorrido de 30 metros en pendiente 1:100 (1 cm por metro), se logra el intercambio de calor con el terreno, accediendo a una cámara de inspección de 1 x 1,5 m ubicada 2.5 metros bajo tierra, donde se aloja un impulsor que succiona el aire del exterior y lo expulsa hacia el interior de la vivienda. El caño se cubre con pintura asfáltica con el objetivo de reducir al máximo el pasaje de humedad desde el suelo al interior del sistema, esto busca solucionar el posible problema de desarrollo de microorganismos que atentaría con la calidad del aire.

Tomando como base lo desarrollado en el trabajo [42], se elige un ventilador centrífugo como elemento activo del sistema, marca Gatti modelo RA120. Las características del ventilador son: diámetro 0,32 m, potencia 0.18 CV, caudal 540 m<sup>3</sup>/h y a 2810 rpm. El mismo se ubica dentro de la cámara de inspección.

A partir de dicha cámara, la cañería asciende a nivel de contrapiso y lo recorre por toda la longitud necesaria para distribuirlo en los puntos terminales llegando a rejillas de expulsión de 15 x 15 cm que permiten mezclarlo con el aire interior y climatizar los ambientes.

La disposición de tubos a utilizar es la de anillo, donde si bien se requiere disponer de la superficie necesaria para ser instalado, es la recomendable para las viviendas unifamiliares ya que emplea 1 tubo enterrado entre 1.5 y 3 metros de profundidad. El caudal óptimo a emplear es entre 150 y 300 m<sup>3</sup>/h.

Las [Figura 24](#), [25](#) y [26](#) muestran el desarrollo de la instalación del ICTA.



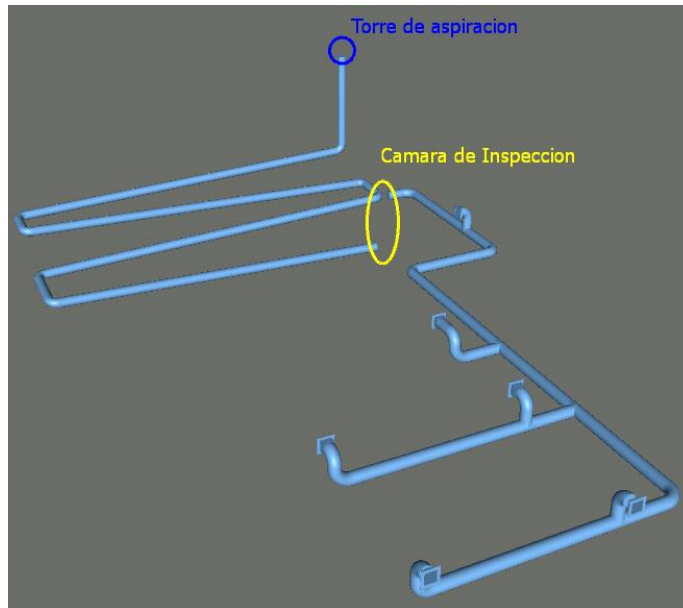


Figura 24. Desarrollo de la instalación del ICTA. Elaboración propia.

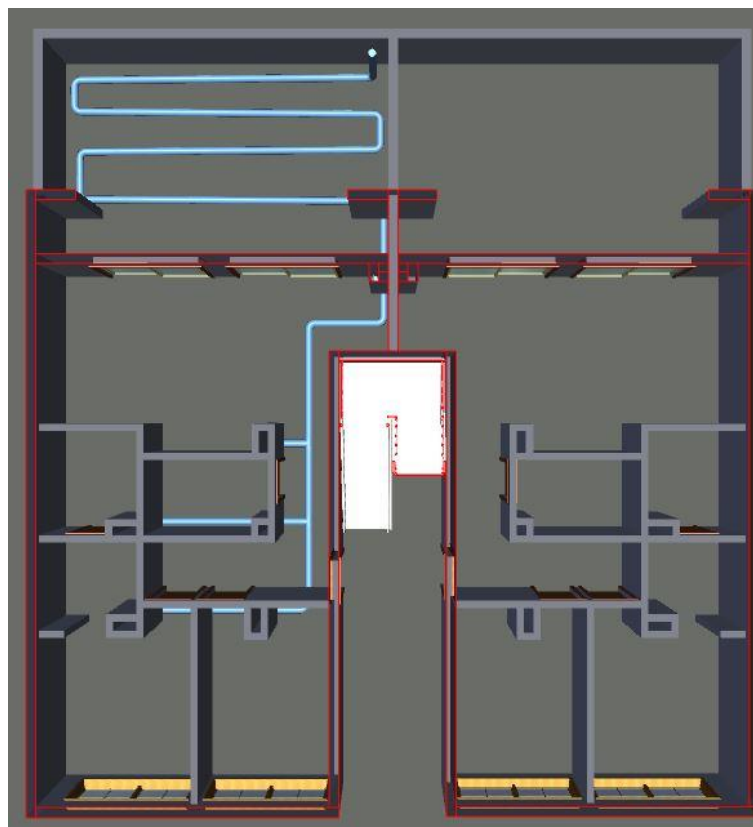
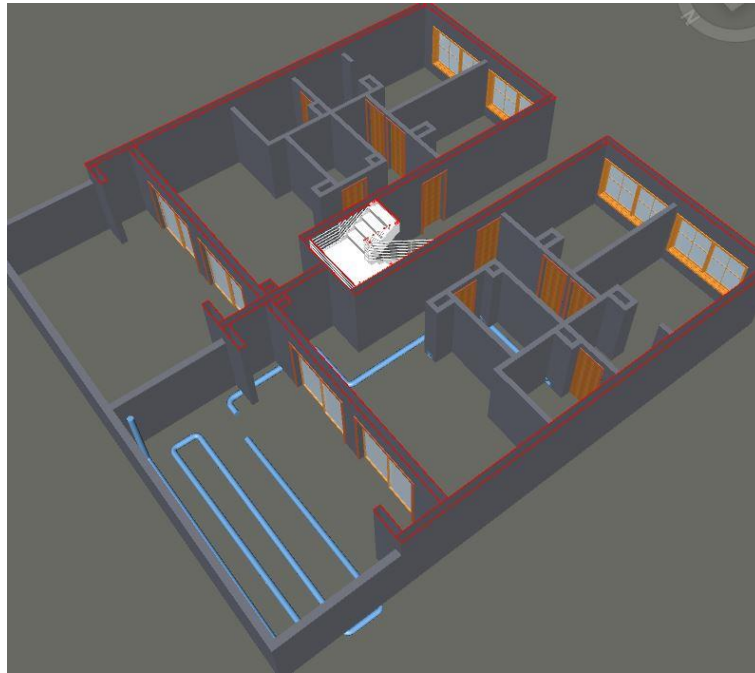


Figura 25. Vista en planta de la instalación del ICTA. Elaboración propia.



**Figura 26.** Vista lateral de la instalación del ICTA. Elaboración propia.

### Metodología analítica de dimensionamiento del intercambiador tierra-aire (ICTA)

En esta sección se exponen los resultados de la aplicación de la metodología analítica descrita exhaustivamente en [41], por lo tanto, aquí se expone un resumen gráfico, que junto con los resultados del cálculo de dimensionamiento se condensan en una serie de Tablas.

#### Construcción: tipología y componentes del ICTA

La **Tabla 3** condensa las 3 disposiciones en que se agrupan los ICTA, acordes al tipo de aplicación. A su vez, ésta determina el caudal óptimo a gestionar, el número de conductos a utilizar y la profundidad de instalación. También describe la función de los componentes del sistema, ya descritos en la **Figura 12** de la sección 3.

Construcción del ICTA			
	Captación	Circulación	Impulsión
Componentes	Torre de aspiración	Colector, conductos, drenaje	Impulsión, distribución, extracción
Materiales		PVC	
Tipologías del ICTA			
La elección depende del espacio disponible y del caudal de aire a termalizar			
	Anillo	Rejilla	Bloque-rejilla
nº de tubos	1	> 1	> 2
Profundidad [m]	1.5 - 3	3	
Caudal óptimo [m <sup>3</sup> /h]	150 - 300	> 300	
Uso	viviendas unifamiliares - edificios pequeños	grandes volúmenes a climatizar	invernaderos y naves de cría
Componentes del ICTA			
Componente	Función		
Torre de aspiración	Toma el aire del exterior y lo transporta verticalmente al intercambiador, pasando por un filtro		
Colector	Distribuye el aire entre los conductos transversales, en caso de haber más de uno		
Conductos	Tubos transversales donde ocurre el intercambio de calor		
Drenaje	Elimina el agua de condensación evitando hongos y malos olores		
Sistema mecánico de impulsión	Mantiene la velocidad del aire y el caudal constantes		
Distribución y extracción	Conductos, caudales y rejillas necesarios para la impulsión en las diferentes estancias		
Materiales	PVC, polipropileno, hormigón pretensado, cerámica, tubos metálicos galvanizados		

**Tabla 3.** Descripción de la construcción: tipología y componentes del ICTA.

### Condiciones del Terreno

La temperatura del terreno cambia con la profundidad, radiación solar, precipitaciones y otros efectos atmosféricos que inducen cambios de temperatura en las capas superficiales, a lo largo del año. La geotermia somera utiliza la temperatura constante del medio subterráneo, en torno a 17-20°C, para extraer o disipar calor, por lo que se utilizarán expresiones de cálculo de la temperatura acordes a este intervalo. Como se explicó en la sección 3, la temperatura superficial del suelo varía en forma senoidal y se caracteriza mediante tres variables conocidas: la temperatura media anual superficial  $T_m$  (°C), la amplitud superficial  $A_s$  (°C) (tomada como la mayor diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura media del terreno, que es la media anual del aire) y el desfase  $t_0$  (días). La **Tabla 4** expone las condiciones del terreno, el modelo de temperatura superficial y del ducto y los parámetros físicos relevantes para el dimensionado.

Condiciones del Terreno	
Gradiente térmico [°C/km]	
Profundidad [m]	Cambio de Temperatura
10 a 12	Determinada por intercambio de calor entre el sol y la atmósfera
60 a 80	Temperatura aproximadamente constante
80 en adelante	Gradiente de 15 a 30 [°C/km]
Temperatura superficial. Forma senoidal caracterizada por 3 variables	
$T(z, t)$ [°C] Temperatura del suelo en el tiempo $t$ a profundidad $z$	$T_{\text{terreno}}(z, t) = T_m - A_s e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos\left[\frac{2\pi}{365}\left(t - t_0 - \frac{z}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right)\right]$
$A_s$ [°C]	Amplitud superficial de la onda sinusoidal
$t_0$ [días]	Desfasaje, día del año en que ocurre el mínimo de temperatura superficial
$\alpha$ [m <sup>2</sup> /día]	Difusividad térmica del suelo
$T(t)$ [°C] Temperatura del aire dentro del tubo en el tiempo $t$	En SIMEDIF la temperatura del aire se calcula en base a una discretización temporal y espacial a lo largo del ducto, utilizando como condición de borde la temperatura del terreno.
Conductividad térmica $\lambda$ [W/m <sup>2</sup> K]	
Es la propiedad de un material para conducir calor. Se expresa según la ley de Fourier	
Capacidad térmica o volumétrica $C_p = \rho C$ [kJ/m <sup>3</sup> K]	
Cociente entre la cantidad de calor transferida a un cuerpo y su cambio de temperatura	
Difusividad térmica $\alpha = \lambda/\rho C$ [m <sup>2</sup> /s]	
Expresa la velocidad de flujo de calor para alcanzar el equilibrio térmico. Es el valor más relevante para dimensionar un ICTA	

**Tabla 4.** Condiciones del terreno, modelo de temperatura superficial y del ducto y parámetros físicos relevantes.

### Proceso físico

El proceso físico que se produce en los conductos utiliza la hipótesis de temperatura externa constante en el entorno del ducto, indicando que la inercia térmica del terreno es muy superior al intercambio de calor acaecido en el ducto.

El flujo de calor por unidad de superficie que tiene lugar en el tubo (proporcional a la diferencia de temperatura entre el terreno y el aire interior al ducto) y la resistencia térmica de éste, dada por la conductividad térmica del material y la velocidad del aire que fluye en él, determinan la cantidad de calor ( $Q$ ) intercambiada por unidad de tiempo como función del flujo de calor que atraviesa la superficie ( $S$ ) del ducto. La **Tabla 5** contiene las variables de este proceso físico.

Proceso Físico	
Hipótesis	Temperatura externa del tubo constante
Flujo de calor por unidad de superficie [W/m <sup>2</sup> ]	$\varphi_m = \left  \frac{(T_{\text{terreno}} - T_{\text{ma}})}{R} \right $
Resistencia térmica [m <sup>2</sup> K/W]	$R = R_{\text{conducción}} + R_{\text{convección}} = \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{5,55v^{0,8}}$ $e$ (espesor de la pared) $v$ (velocidad del aire [m/s])
Calor intercambiado [J]	$dQ = \varphi S dt$ $S$ (superficie)
Variación de temperatura del aire [K/m <sup>3</sup> ]	$dT_{\text{aire}} = \frac{dQ}{C\delta V}$ $C$ (calor masivo) = 1kJ/kgK $\delta$ (densidad del aire) = 1,2 [kg/m <sup>3</sup> ]

**Tabla 5.** Proceso físico y variables determinantes del calor intercambiado en el ducto.

## Dimensionado

El dimensionamiento del ICTA está determinado, por los parámetros siguientes:

- Caudal volumétrico de aire
- Profundidad de montaje
- Material y dimensiones del tubo
- Valores característicos del subsuelo
- Clima en el emplazamiento de la instalación

El cálculo de la entalpía de mezcla ( $h$ ) se tomó de la referencia [43]. Esta herramienta calcula la entalpía del aire húmedo como la suma de la entalpía del aire seco y la entalpía del vapor de agua que contiene, usando como datos de ingreso la temperatura del aire de ingreso o egreso del ducto en grados Celsius y la fracción másica de agua ( $x$ : valor comprendido entre 0 y 1). El criterio de selección para la fracción molar másica del aire húmedo fue para verano e invierno:  $x = 0.71$  y  $x = 0.10$ , respectivamente, obtenidos de la página web “El clima promedio en Córdoba” [44].

La **Tabla 6** resume las variables utilizadas en el dimensionado del ICTA, que conducen a establecer la energía que debe intercambiar el aire del ducto con el terreno, que a su vez determinar las dimensiones, superficie de intercambio ( $S$ ) y longitud ( $L$ ) del ducto.

Dimensionado	
Orden de elección	Profundidad, diámetro interior, espesor de paredes, nº de conductos, longitud
Caudal por conducto [ $m^3/s$ ]	$q_t = Av$ Demandado por el edificio, determina la sección del ducto y la velocidad de impulsión del aire
Número de conductos	$n = \frac{q_T}{q_t}$
Temperatura media del aire en los ductos	$T_{ma} = \left  \frac{T_{ae} - T_{as}}{2} \right $ $T_{ae} = T$ del aire de entrada $T_{as} = T$ del aire de salida
$E_e =$ energía a eliminar del aire [ $Ws/m$ ] $h =$ entalpía de la mezcla (aire + vapor de agua) [ $kJ/kg$ ]	$E_e = \left( \frac{h}{V_e} \right)_{salida} - \left( \frac{h}{V_e} \right)_{entrada}$ $h = 1.005 * T[^\circ C] + x(1.88 * T[^\circ C] + 2501)$ $V_e = 1/\rho$ [ $m^3/kg$ ] $\rho = mMP/RT$ [ $kg/m^3$ ] $x =$ fracción másica de agua ( $0 < x < 1$ ) [ $kg/kg$ ] $mM = 0.2 * 32 + 0.8 * 28 = 14.4$
Superficie de intercambio [ $m^2$ ]	$S = \frac{E_e q_t}{\varphi_m}$
Longitud [ $m$ ]	$L = S/P$ $P = 2\pi R$ $L_{lim}$ límite a partir de la cual el intercambio de calor es despreciable

**Tabla 6.** Dimensionado del ICTA.

## Cálculo

La temperatura media mensual del aire ( $T_{ma}$  °C), su temperatura media anual que determina la temperatura media anual superficial del suelo ( $T_{mss}$  °C) y la amplitud superficial  $A_s = |T_{ma} - T_{mss}|$  (°C) utilizadas en el trabajo, se muestran en la **Tabla 7**, cuyos valores se obtuvieron de la página web “El clima promedio en Córdoba” [44].

MES	$T_{ma}$ (°C)	$A_s =  T_{ma} - T_{mss} $ (°C)
Enero	23.8	6.7
Febrero	22.4	5.3
Marzo	20.2	3.1
Abril	17.1	0.0
Mayo	13.3	3.9
Junio	10.6	6.6
Julio	9.8	7.4
Agosto	12.1	5.1
Septiembre	14.9	2.3
Octubre	18	0.9
Noviembre	20.7	3.6
Diciembre	22.9	5.8
$T_{mss}$ (°C) = $T_{media\ anual\ del\ aire}$	17.15	

**Tabla 7.** Temperatura media mensual del aire y Temperatura media anual superficial del suelo y amplitud superficial.

Los caudales de ventilación establecidos para la planta baja, tanto en verano como en invierno, se muestran en la **Tabla 8**. El valor del caudal medio resultante fue  $q_T = 251 [m^3/h] = 0.07 [m^3/s]$ .

Superficies	Espacios	Renovaciones [h]	Áreas [m <sup>2</sup> ]	Área por región	Volúmenes [m <sup>3</sup> ]	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	Caudal medio [m <sup>3</sup> /h]
Planta Baja	Suite	1.5	26.00	104.38	67.6	101.40	383.66
	Baño suite	1.5	9.80		25.5	38.22	
	Dormitorio 2	1.5	22.48		58.4	87.67	
	Vestidor 2	1.0	3.48		9.0	9.05	
	Baño Grande	1.5	8.20		21.3	31.98	
	Dormitorio 1	1.5	19.88		51.7	77.53	
	Pasillo 2	1.0	14.54		37.8	37.80	
	Estar - cocina	2.0	23.25	23.25	59.3	118.58	118.58
Total caudal a suministrar		11.5	127.63		330.7	502.23	251.12

**Tabla 8.** Caudal medio  $q_T = 251 [m^3/h] = 0.07 [m^3/s]$ .

Para el cálculo de la longitud (L) del ducto, se consideró la situación más extrema en verano e invierno, para optar por la más desfavorable. Por eso las temperaturas máxima y mínima promedio, tomadas de la referencia [44] para el aire a la entrada del ducto, fueron 30°C y 5°C, respectivamente. Las temperaturas a la salida del ducto y la del terreno a nivel del ducto, se obtuvo de SIMEDIF y se eligieron las correspondientes a 30 m de longitud. De esta manera, se pretende corroborar si el resultado analítico es consistente con el simulado con el software, con la ventaja de dar un entendimiento más profundo del proceso físico interviniente en el ICTA.

Los resultados del cálculo para verano e invierno son:  $L = 31.25 \text{ m}$  y  $L = 31.55 \text{ m}$ , respectivamente. Por lo tanto, se elige como longitud adecuada a la de invierno, que es la más desfavorable. Los detalles para el cálculo del ICTA se muestran en la [Tabla 9a y 9b](#).

Cálculo del ICTA	
Ubicación	provincia de Córdoba (-32°, -64°)
$T_{\text{anual media}}$ del aire [°C]	17.15
$A_s$ [°C]	7.4
Profundidad media [m]	2.5
$q_T$ [m <sup>3</sup> /h]; [m <sup>3</sup> /s]	(251; 0.07)
[m/s] Características del Ducto	
Diámetro nominal interno (DN) [m]	0.16
Espesor $e =$ [m]	0.0088
Area $A = \pi(DN/2)^2$ [m <sup>2</sup> ]	0.02
Perímetro $P = \pi DN$ [m]	0.50
$q_t = A \cdot v$ [m <sup>3</sup> /s]	0.07
$n = q_T/q_t$	1
Tipología	anillo
Velocidad del aire [m/s]	3.48
Material, conductividad térmica $\lambda$	(PVC; 0.17)

**Tabla 9a.** Cálculo del ICTA.

Verano: caso más desfavorable				
$T_{ae}$ [°C]	30			
$T_{as}$ [°C] a 30m	18.53			
$T_{terreno}$ a nivel del ducto [°C]	17.59			
$T_{ma} = \frac{T_{ae} + T_{as}}{2}$ [°C]	24.27			
$R = R_{conducción} + R_{convección}$	$R = \frac{0.0088}{0.17} + \frac{1}{5,55(3.48)^{0.8}} = 0.12$			
$\varphi_m = \left  \frac{(T_{terreno} - T_{ma})}{R} \right $	$\varphi_m = \left  \frac{(17.59 - 24.27)}{0.12} \right  = 55.67$			
Entalpía (aire + vapor de agua) [kJ/kg] $h_i = 1.005 * T_i + x(1.88 * T_i + 2501)$ $i = e; s$	$mM = 14.4$ $T_e$ [°C] = 30 $T_s$ [°C] = 18.53	$\rho(e) = 0.58$ [kg/m <sup>3</sup> ] $\rho(s) = 0.60$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$V_e = 1/\rho(e) = 1.72$ $V_s = 1/\rho(s) = 1.67$	$x = 0.71$ $h(e) = 1854$ $h(s) = 1812$
Energía a intercambiar del aire [Ws/m] $E_e = \left  \left( \frac{h(s)}{V_e} \right)_{salida} - \left( \frac{h(e)}{V_e} \right)_{entrada} \right $	$E_e = \left  \left( \frac{1812}{1.67} \right)_{salida} - \left( \frac{1854}{1.72} \right)_{entrada} \right  = 12.42515 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right] = 12425.15$ [Ws/m]			
$S = \frac{E_e q_t}{\varphi_m}$ [m <sup>2</sup> ]	$S = \frac{12425.15 * 0.07}{55.67} = 15.62$			
$L = S/P$ [m]	$L = 15.62/0.50 = 31.25$			
Invierno: caso más desfavorable				
$T_{ae}$ [°C]	5			
$T_{as}$ [°C] a 30m	16.60			
$T_{terreno}$ a nivel del ducto [°C]	18.55			
$T_{ma} = \frac{T_{ae} + T_{as}}{2}$ [°C]	10.8			
$R = R_{conducción} + R_{convección}$	$R = \frac{0.0088}{0.17} + \frac{1}{5,55(3.48)^{0.8}} = 0.12$			
$\varphi_m = \left  \frac{(T_{terreno} - T_{ma})}{R} \right $	$\varphi_m = \left  \frac{(5 - 10.80)}{0.12} \right  = 48.33$			
Entalpía (aire + vapor de agua) [kJ/kg] $h_i = 1.005 * T_i + x(1.88 * T_i + 2501)$ $i = e; s$	$mM = 14.4$ $T_e$ [°C] = 5 $T_s$ [°C] = 16.60	$\rho(e) = 0.63$ $\rho(s) = 0.61$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$V_e = 1/\rho(e) = 1.59$ $V_s = 1/\rho(s) = 1.64$	$x = 0.10$ $h(e) = 245$ $h(s) = 270$
Energía a eliminar del aire [Ws/m] $E_e = \left  \left( \frac{h(s)}{V_e} \right)_{salida} - \left( \frac{h(e)}{V_e} \right)_{entrada} \right $	$E_e = \left  \left( \frac{270}{1.64} \right)_{salida} - \left( \frac{245}{1.59} \right)_{entrada} \right  = 10.54609 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right] = 10546.09$ [Ws/m]			
$S = \frac{E_e q_t}{\varphi_m}$ [m <sup>2</sup> ]	$S = \frac{10546.09 * 0.07}{48.33} = 15.27$			
$L = S/P$ [m]	$L = 31.06/0.50 = 31.55$			

Tabla 9b. Cálculo del ICTA.

## Simulación del Caso de Estudio con SIMEDIF

En esta sección se aplica al caso de estudio el proceso de simulación descrito en la sección 3, con el objeto de corroborar los resultados analíticos exhibidos en la **Tabla 9b**. En particular se estudia la variación en la temperatura del aire de salida del ducto ( $T_{as}$ ) en función de la longitud (L) del mismo, para condiciones de suelo seco y compacto. El objetivo es obtener la longitud óptima  $L_{lim}$ , a partir de la cual el intercambio de calor es despreciable, tal como se mencionó en el trabajo de la referencia [30].



SIMEDIF considera un conducto rectangular de ancho  $W$ , altura  $H$  y longitud  $L$  (todas en m), enterrado a una profundidad determinada (en m). Como en este caso se utiliza un conducto cilíndrico de radio  $R$ , se calculan el ancho y altura equivalentes a un conducto cuadrado con la misma área de transferencia, como  $W = H = \pi R/2$ . Las Tablas 10 y 11 muestran los resultados para verano e invierno, respectivamente.

VERANO: Estudio de $T_{as}$ en función de la Longitud del ducto													
SUELO SECO Y COMPACTO													
Período	Ducto			Terreno					Aire				
(enero)	Radio	$W = H$	Long. L	Prof.	$T_{media\ anual}$	Ampl.	Desf.	$T_{terreno}$	Vel. aire	$T_{ae}$	$T_{as}$	$\Delta T_{as-ae}$	Ganancia
[días]	$R = 0.08$	$\pi R/2$ [m]	[m]	[m]	sup. suelo	$A_s$	$t_0$	nivel ducto	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]	
31	0.08	0.1256	10	2.5	17.2	7.4	199	17.59	3.48	30	22.84	-7.16	-3.03
			20								19.81	-10.19	-1.28
			30								18.53	-11.47	-0.55
			40								17.98	-12.02	-0.22
			50								17.76	-12.24	-0.10
			60								17.66	-12.34	

Tabla 10. Temperatura del aire de salida del ducto  $T_{as}$  en función de la longitud  $L$  en verano.

INVIERNO: Estudio de $T_{as}$ en función de la Longitud del ducto													
SUELO SECO Y COMPACTO													
Período	Ducto			Terreno					Aire				
(julio)	Radio	$W = H$	Long. L	Prof.	$T_{media\ anual}$	Ampl.	Desf.	$T_{terreno}$	Vel. aire	$T_{ae}$	$T_{as}$	$\Delta T_{as-ae}$	Ganancia
[días]	$R = 0.08$	$\pi R/2$ [m]	[m]	[m]	sup. suelo	$A_s$	$t_0$	nivel ducto	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]	
30	0.08	0.1256	10	2.5	17.2	7.4	199	18.55	3.48	5	12.24	7.24	3.06
			20								15.30	10.30	1.30
			30								16.60	11.60	0.54
			40								17.14	12.14	0.24
			50								17.38	12.38	0.09
			60								17.47	12.47	

Tabla 11. Temperatura del aire de salida del ducto  $T_{as}$  en función de la longitud  $L$  en invierno.

Para determinar la longitud  $L_{lim}$ , se obtuvieron primeramente los valores  $\Delta T_{as-ae}$ , diferencia en las temperaturas del aire de salida y el de entrada para cada longitud del ducto desde 10m hasta 60m. Se definió la variable "Ganancia ( $G$ )" como la diferencia de  $\Delta T_{as-ae}$  entre las distintas longitudes del ducto y se tomó como criterio que aquellos valores  $G < 1$ , a partir de los cuales el aumento en  $L$  tiene incidencia poco significativa en la temperatura del aire de salida. Ver Figura 27

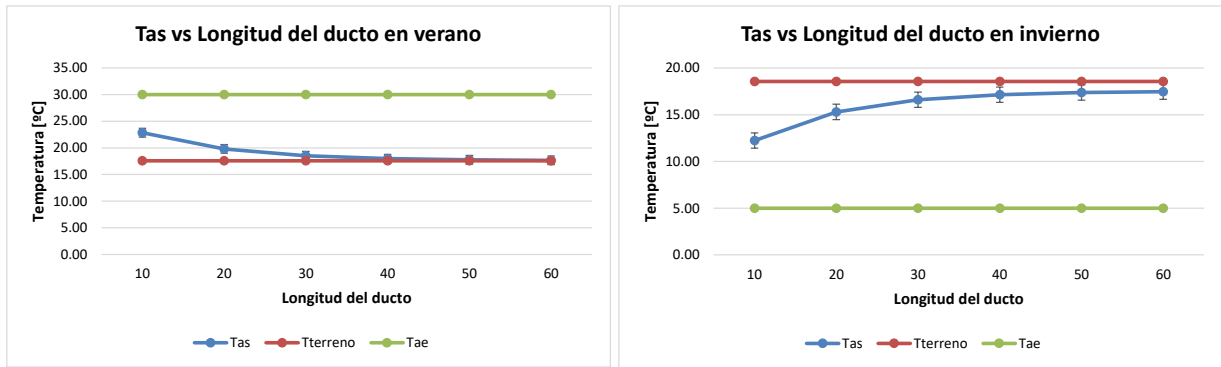


Figura 27. Comportamiento asintótico de la temperatura del aire de salida del ducto  $T_{as}$  en función de la longitud  $L$ . Izq.verano, der. invierno.

Los valores obtenidos para las dos estaciones extremas son  $L_{lim} = 30m$  corroborando los resultados analíticos.

En el cálculo anterior se utilizó la *amplitud y temperatura media del aire ambiente* como dato de entrada de *amplitud y temperatura media del suelo* (el cual es un dato difícil de obtener): **temperatura media 17.2°C, amplitud 7.4°C y desfase 199 días**.

Dado que estos valores no son 100% iguales, el manual SIMEDIF indica que la mejor opción cuando no hay datos es simular con la herramienta de preprocesado EnergyPlus (CalcSoilSurfTemp). Tomando los datos del TMY de Córdoba resulta: **temperatura media 19.6°C, amplitud 7.5°C y desfase 228 días**. Utilizando estos datos para las corridas, se observa en las Tablas 12 y 13 que la "Ganancia ( $G$ )" continúa siendo  $G < 1$ , para los mismos valores de  $L$  (30 m) a partir de los cuales tiene incidencia poco significativa en la temperatura del aire de salida.

VERANO: Estudio de $T_{as}$ en función de la Longitud del ducto													
SUELO SECO Y COMPACTO													
Periodo	Ducto			Terreno					Aire				
(enero)	Radio	$W = H$	Long. L	Prof.	$T_{media\ anual}$	Ampl.	Desf.	$T_{terreno}$	Vel. aire	$T_{ae}$	$T_{as}$	$\Delta T_{as-ae}$	Ganancia
[días]	$R = 0.08$	$\pi R/2$ [m]	[m]	[m]	sup. suelo	$A_s$	$t_0$	nivel ducto	[m/s]	[°C]	[°C]	[°C]	
					[°C]	[°C]	[días]	[°C]					
31	0.08	0.1256	10	2.5	19.6	7.5	228	19.6	3.48	30	24.08	-5.92	-2.56
			20								21.52	-8.48	-1.10
			30								20.42	-9.58	-0.47
			40								19.95	-10.05	-0.20
			50								19.75	-10.25	-0.08
			60								19.67	-10.33	

Tabla 12. Temperatura del aire de salida del ducto  $T_{as}$  en función de la longitud  $L$  en verano.

INVIERNO: Estudio de $T_{as}$ en función de la Longitud del ducto													
SUELO SECO Y COMPACTO													
Período	Ducto			Terreno					Aire				
(julio) [días]	Radio $R = 0.08$ [m]	$W = H$ $\pi R/2$ [m]	Long. L [m]	Prof. [m]	$T_{media\ anual}$ sup. suelo [°C]	Ampl. $A_s$ [°C]	Desf. $t_0$ [días]	$T_{terreno}$ nivel ducto [°C]	Vel. aire [m/s]	$T_{ae}$ [°C]	$T_{as}$ [°C]	$\Delta T_{as-ae}$ [°C]	Ganancia
30	0.08	0.1256	10	2.5	19.6	7.5	228	19.6	3.48	5	13.42	8.42	3.56
			20								16.98	11.98	1.50
			30								18.48	13.48	0.64
			40								19.12	14.12	0.27
			50								19.39	14.39	0.11
			60								19.50	14.50	

Tabla 13. Temperatura del aire de salida del ducto  $T_{as}$  en función de la longitud  $L$  en invierno.

### Análisis de costos de instalación

La Tabla 12 muestra un análisis comparativo del costo de instalación de un ICTA y un HVAC.

Climatización					
ICTA			HVAC		
Tarea	Costo unitario [\$]	Costo total [\$]	Tarea	Costo unitario [\$]	Costo total [\$]
Instalación de ducto de PVC desde toma de aire en punto seco a 2m de altura, recorrido de 30m a 2.5m de profundidad hasta cámara de inspección			Instalación de 45m de caño de cobre desde la unidad split hasta el motor en la terraza	2,800	126,000
Construcción de cámara de inspección de 0.60m x 0.6m a 2.5m de profundidad con acceso a tapón de purga e impulsor			Instalación de 3 equipos de HVAC	8,500	25,500
Cañería de distribución desde cámara de inspección hasta los ambientes de la PB, dejando rejilla de ventilación a 0.3m			Materiales para 3 split HISENSE HSI35WCAR FRÍO - CALOR 2750 FRIGORÍAS	52,250	156,750
Mano de Obra	1	110,000			
Materiales: cañería, mampostería, cámara de inspección	1	120,000			
Costo total		230,000	Costo total		308,250

Tabla 14. Análisis comparativo del costo de instalación de un ICTA y un HVAC.

El resultado muestra que el costo de instalación del ICTA es 25% menor que el de 3 equipos HVAC, ambos sistemas propuestos para climatizar la PB del caso de estudio.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para el caso de estudio, mediante la aplicación de un método analítico que permite entender el proceso físico que opera en un ICTA, sumados a los obtenidos por la simulación del módulo del software SIMEDIF, fueron consistentes y permitieron dilucidar que con la instalación de un ICTA de  $L_{lim} = 30m$  de PVC, es posible pre acondicionar el aire de ingreso a la residencia, con temperaturas dentro del rango de confort en el caso de verano, o muy cercanas, en el caso de invierno.

Por otra parte, el costo de instalación del ICTA resulta 25% menor que el de 3 HVAC necesarios para climatizar la PB del caso de estudio. Esto sin considerar que el HVAC requerirá un consumo de energía mayor al ICTA en el transcurso de su utilización, ya que el primero requiere un impulsor de potencia  $3/4 [HP]$  para el caudal necesario, mientras que el segundo de  $3300 [W]$ , considerando que  $1 [HP] = 745.7 [W]$ .

De este modo, el trabajo de investigación permitió responder a los interrogantes e hipótesis planteadas en secciones anteriores. La energía geotérmica tiene ciertas ventajas comparativas frente a otras fuentes de energía primaria, en particular por el menor impacto ambiental de su utilización. Cabe mencionar que *“cada unidad de energía ahorrada a través del UREE equivale a evitar la generación de casi tres unidades”*. Es decir, si por implementación del UREE conseguimos ahorrar una cantidad de energía igual a la que genera una central como el Chocón es equivalente a que el país se evite la construcción de tres Chocón. Con todos los beneficios que ello implica, económicos, ambientales y el cuidado y buena administración de los recursos primarios energéticos [45].

Se destaca la posibilidad de utilización del sistema ICTA para todas las zonas del país. En el caso particular de la provincia de Córdoba, hay regiones, tales como Sierras Chicas en las que no hay abastecimiento de gas natural, y por lo tanto sería aplicable el empleo de la geotermia somera.

Estudios y resultados comprobados, permiten asegurar que pueden lograrse ahorros del orden del 70% en calefacción y refrigeración en viviendas con buena aislación [46]

## 9. CONCLUSIÓN

Considerando la necesidad de la Transición Energética a nivel mundial, es imprescindible recurrir al uso de energías renovables sumadas a los mecanismos del UREE, para alcanzar una sociedad energética y ambientalmente equilibrada.

La geotermia somera es una energía renovable ampliamente utilizada y útil para climatizar cualquier tipo de ambiente, desde viviendas unifamiliares hasta grandes complejos como hospitales o centros universitarios. A pesar que su uso es extendido a nivel mundial, hay un importante desconocimiento en Argentina sobre sus posibilidades de explotación

La geotermia somera puede explotarse prácticamente en cualquier lugar, a diferencia de la geotermia profunda, ya que no está vinculada a puntos calientes del subsuelo ni a aguas termales. Su ubicuidad es una de sus ventajas más representativas, ya que utiliza la temperatura constante del medio subterráneo, en torno a 17-20 °C, para extraer o disipar calor, independientemente de las condiciones atmosféricas, a diferencia de la energía solar o eólica; por lo tanto, su explotación es constante a lo largo de todo el año. Además, es posible vincularla al uso de ventilación mecánica controlada VMC o bombas de calor, con lo cual se aumenta más aún su eficiencia.

## 10. REFERENCIAS

---

- [1] Mario Tomasino & Francesco Dalla Valle (2000) Natural climatic changes and solar cycles: an analysis of hydrological time series, *Hydrological Sciences Journal*, 45:3, 477-489, DOI: [10.1080/02626660009492343](https://doi.org/10.1080/02626660009492343).
- [2] Gian Paolo Beretta. World energy consumption and resources: an outlook for the rest of the century. *Int. J. Environmental Technology and Management*, Vol. 7, Nos. 1/2, 2007.
- [3] SYR IPCC 2014: Climate change 2014: Synthesis Report to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by The Core Writing Team, R. K. Pachauri, L. Meyer (accessible en version sin editar en [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_LONGERREPORT.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_LONGERREPORT.pdf))
- [4] Calentamiento-global-de-wikipedia-la-enciclopedia-871249447409.html
- [5] Vaughan, A. «Global carbon dioxide levels break 400ppm milestone». *The Guardian*.
- [6] Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey –Tesis: Utilización de la energía geotérmica para la vivienda, una aproximación al caso mexicano. Autor: Sebastien Corbeau. Año: 2007.
- [7] Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey –Tesis: Utilización de la energía geotérmica para la vivienda, una aproximación al caso mexicano. Autor: Sebastien Corbeau. Año: 2007
- [8] Geothermal Energy – Clean Power from the earth’s Heat. Autor: Wendell A. Duffield & John H. Sass. U.S. Departamento del interior y U.S. Servicios Geológicos. USGS Science for a changing World. Ejemplar 1249. Año: 2003. Página 27
- [9] Geothermal Energy – Clean Power from the earth’s Heat. Autor: Wendell A. Duffield & John H. Sass. U.S. Departamento del interior y U.S. Servicios Geológicos. USGS Science For A Changing world. Ejemplar 1249. Página 27. Año: 2003.
- [10] Cartografía. Disponible en: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/los-indicadores-empeoraron-y-los-impactos-del-cambio-clim%C3%A1tico-se>.
- [11] Global Carbon Atlas (2017).
- [12] Proyecto fin de Carrera. Titulación: Arquitectura técnica. Utilización de la energía geotérmica en Vivienda unifamiliar y comparativa de certificación energética. Autor: Cristobal Jose Giner Mora. Tutora: Gemma Vazquez Arenas. Año: 2013.
- [13] Sebastien Corbeau (2007) Utilización de la energía geotérmica para la vivienda, una aproximación al caso mexicano. Tesis. Instituto Tecnológico y de estudios superiores de monterrey. Página 11.
- [14] Jean-Marc Jancovici.
- [15] GIROD GEOTERMIA. <https://girodgeotermia.com/que-es-la-energia-geotermica/>
- [16] Cataldi, Raffaele (agosto de 1993). "Revisión de los aspectos historiográficos de la energía geotérmica en las zonas mediterráneas y mesoamericanas anteriores a la Edad Moderna" (PDF) . Boletín trimestral del Geo-Heat Center . 15 (1): 13–16. ISSN 0276-1084 . Consultado el 1 de noviembre de 2009 .
- [17] Geothermal Communities (GEOCOM). Autor: Barry Goldstein y Gerardo Hiriart. Geothermay Energy Pdf. Página 405.
- [18] ¿Qué es la matriz energética? Disponible en: <http://energiasdemipais.educ.ar/la-matriz-energetica-argentina-y-su-evolucion-en-las-ultimas-decadas/>.
- [19] Hacia una Visión Compartida de la Transición Energética Argentina al 2050. Buenos Aires (Argentina): Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de <http://www.escenariosenergeticos.org/>

- 
- [20] Leila Iannelli, Jorge Fiora y Salvador Gil. La tierra como acondicionador de aire. Revista Petrotecnia. Páginas 34 – 41. Año: 2013.
- [21] Fabrizio Ascione, Martina Borrelli, Rosa Francesca De Masi, Giuseppe Peter Vanoli, Hourly operational assessment of HVAC systems in Mediterranean Nearly Zero-Energy Buildings: Experimental evaluation of the potential of ground cooling of ventilation air, Renewable Energy, Volume 155, 2020, Pages 950-968, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.180>.
- [22] Haibin Wei, Dong Yang, Jinhui Du, Xin Guo, Field experiments on the effects of an earth-to-air heat exchanger on the indoor thermal environment in summer and winter for a typical hot-summer and cold-winter region, Renewable Energy, Volume 167, 2021, Pages 530-541, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.112>.
- [23] Suresh Kumar Soni, Mukesh Pandey, Vishvendra Nath Bartaria, Ground coupled heat exchangers: A review and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 47, 2015, Pages 83-92, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.014>.
- [24] Jiajia Gao, Anbang Li, Xinhua Xu, Wenjie Gang, Tian Yan, Ground heat exchangers: Applications, technology integration and potentials for zero energy buildings, Renewable Energy, Volume 128, Part A, 2018, Pages 337-349, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.089>.
- [25] Balance energético Nacional 2018.
- [26] Leila Mora Iannelli. “Acondicionamiento Térmico de Aire mediante el uso de Energía Geotérmica”. Tesis de Licenciatura en Análisis Ambiental Escuela de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional de San Martín Febrero de 2013.
- [27] La tierra como acondicionador de aire. Revista Tecnología y Ciencia. UTN. Autores: Iannelli, Fiora, Gill. Año: 2014.
- [28] REHAU. Disponible en: <https://studylib.es/doc/7704694/rehau-pozos-provenzales-o-pozos-canadienses>.
- [29] Hacia una Visión Compartida de la Transición Energética Argentina al 2050. Buenos Aires (Argentina): Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de <http://www.escenariosenergeticos.org/>
- [30] M. E. Carro Pérez, A. Peiretti, F. M. Francisca. *ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA EN SUELOS LOÉSICOS: CÁLCULO y DISEÑO PARA CASO DE ESTUDIO*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 22, pp 04.23-04.34, 2018. Impreso en la Argentina. ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES2018.
- [31] SIMEDIF. Disponible en: <http://inenco.unsa.edu.ar/desarrollo-de-software/>.
- [32] Flores Larsen S., Lesino G. *INTERCAMBIADORES TIERRA-AIRE: USO DEL SUELO PARA ENFRIAMIENTO PASIVO*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente; vol. 4. Pág. 59-64.
- [33] Labs, K. y Harrington, K. (1982). Regional Suitability of earth tempering. Proceedings Earth Shelter Performance and Evaluation. L. L. Boyer, ed. Stillwater, OK: Architectural Extension/Oklahoma State University, pp.41-51.
- [34] [https://www.arquimaster.com.ar/especiales/nota\\_casae\\_eficiencia\\_energetica.htm](https://www.arquimaster.com.ar/especiales/nota_casae_eficiencia_energetica.htm)
- [35] Geotermia. Disponible en: <https://www.fovisee.org/proyecto/geotermia/>.
- [36] <https://www.fovisee.org/proyecto/geotermia/>.
- [37] <https://www.harmoniechateau.com.ar/emprendimiento>
- [38] Aplicación de energía Geotérmica en sistemas de aire acondicionado Autor: Joaquín Tizeira. Disponible en: <https://ashraeargentina.com/blog/aplicacion-de-geotermia-en-instalaciones-de-aire-acondicionado/>.

- 
- [39] Cálculo de una instalación geotérmica. Trabajo final de grado: Cálculo de sondas geotérmicas. Autor: Alcor Rodríguez. Director: J.J. de Felipe. Universidad Politécnica de Catalunya. Página 29.
- [40] Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio técnico PER 2011-2020. Año: 2011.
- [41] Sergio Martín Díaz. *“El terreno como intercambiador”*. Enfriamiento pasivo aplicado a un edificio de nueva planta. Tesis de fin de grado. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- [42] A Esteves, J. F. Llano. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO SUBTERRANEO PARA ESCUELAS. EVALUACION DE SU FUNCIONAMIENTO EN LA ESCUELA ALICIA MOREAU DE JUSTO, MENDOZA, ARGENTINA. Revista Averma. Vol 2, Nº 2, Año 1998.
- [43] <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/AirEnthalpy/AirEnthalpy.html>.
- [44] <https://es.weatherspark.com/y/28147/Clima-promedio-en-C%C3%B3rdoba-Argentina-durante-todo-el-a%C3%B1o>.
- [45] D. M. Pasquevich. *LOS BENEFICIOS DEL USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGÍA*. HACIA EL USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGÍA en la Administración Pública Nacional. 2016. DOCUMENTOS IEDS sobre Ciencia y Tecnología ISBN: 978-987-1323-47-0.
- [46] Revista Tecnología y Ciencia. UTN. Autores: Ianelli, Fiora, Gill. Año: 2014.