



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Contaduría y Administración.  
Maestría en Gestión de la Tecnología.

**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD SOBRE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE  
INTERCAMBIO GEOTÉRMICO EN EDIFICIOS COMERCIALES DEL ESTADO DE QUERÉTARO**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Gestión de la Tecnología.

**Presenta:**

Chaparro Guerrero Carolina

**Dirigido por:**

Doctora Denise Gómez Hernández.

**SINODALES**

Dra. Denise Gómez Hernández.  
Presidente

M.C. Salvador Pérez-Arce  
Secretario

Dr. Ignacio Almaraz Rodríguez  
Vocal

M.C. Juan Manuel Peña Aguilar  
Suplente

Dr. Humberto Banda Ortiz

Suplente

Dr. Arturo Castañeda Olalde.  
Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Agosto, 2013  
México

## RESUMEN

El desarrollo innovador de tecnologías verdes, en específico el sistema de intercambio geotérmico, es una alternativa al aire acondicionado convencional que proporciona confort ambiental en las casas y edificios, además de una disminución significativa en el consumo de energía. El costo de las tecnologías alternativas (amigables con el medio ambiente) es mayor que las convencionales; sin embargo, el beneficio a largo plazo puede ser mayor. El objetivo de este trabajo de investigación es analizar la factibilidad de implementar este sistema de intercambio geotérmico, así como el de realizar un análisis de adopción de la tecnología en el edificio de Posgrado de la Facultad de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro, a partir del modelo triangular de adopción de tecnologías limpias. Este estudio tiene un enfoque mixto, en la parte cualitativa se tomaron en cuenta los beneficios sociales y ambientales de la implementación del sistema de intercambio geotérmico, mediante el software RetScreen. Además, se realizó el análisis de adopción de tecnologías limpias mediante el modelo triangular de tecnologías limpias. En la parte cuantitativa se realizó un análisis sobre el costo de inversión, mantenimiento y el retorno de la inversión mediante simple payback, ahorro de energía y el análisis de sensibilidad de los parámetros. El resultado principal de este trabajo es que el Valor Presente Neto (VPN) del sistema de intercambio geotérmico es más bajo en un 33% que el sistema convencional de climatización (Carrier), con un periodo de recuperación (simple payback) de 6.5 años y que los beneficios sociales y ambientales son una reducción de 60 toneladas de CO<sup>2</sup> por año, equivalente a 110 autos y camiones livianos no utilizados.

**(Palabras clave:** Intercambio geotérmico, análisis de factibilidad, modelo de adopción, tecnología verde, barreras de adopción)

## SUMMARY

The innovative development of green technologies, specifically the geothermic exchange system, is an alternative to conventional air conditioning which provides environmental comfort in houses and buildings, as well as a significant decrease in energy consumption. The cost of alternative technologies (environmental-friendly) is higher than conventional technologies; however, the long term benefit can be greater. The objective of this study is to analyze the feasibility of implementing this geothermic exchange system, as well as to carry out an adoption analysis of this technology in the Graduate School building of the Accounting and Administration Department of the Universidad Autónoma de Querétaro (Autonomous University of Queretaro), using a triangular model of adoption of clean technologies. The study uses a mixed approach; in the qualitative part, social and environmental benefits were taken into account in the implementation of the geothermic exchange system using RetScreen software. In addition, an analysis was done of the adoption of clean technologies using the triangular model of clean technologies. In the quantitative part, an analysis was carried out of the investment cost, maintenance and investment return through simple payback, energy savings and a sensitive analysis of the parameters. The main result of this work is that the present net value (PNV) of the geothermic exchange system is 33% lower than conventional air conditioning system (Carrier), with a recovery time (simple payback) of 6.5 years and the social and environmental benefits are a reduction of 60 tons of CO<sup>2</sup> per year, the equivalent of 110 cars and light trucks not being used.

**(Key words:** Geothermic exchange, feasibility analysis, adoption model, green technology, adoption barriers)

## **DEDICATORIAS**

A mis padres por todo el esfuerzo que han dedicado para formarme como persona. Sin ellos no podría estar donde me encuentro.

A mis hermanas por el apoyo y la comprensión que he recibido siempre.

A Héctor por apoyarme desde que inició este proyecto, impulsarme en los momentos difíciles y creer en mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A mi asesora de tesis la Dra. Denise Gómez Hernández, por brindarme sus conocimientos y consejos en toda la maestría y en especial a mi tesis.
- Al M.C. Salvador Pérez-Arce, Dr. Ignacio Almaraz, M.A. Juan Manuel Peña y al Dr. Humberto Banda por su apoyo y aportaciones en mi tesis.
- Al CONACYT por la solvencia económica que me otorgó durante el programa de posgrado de la Maestría en Gestión de la Tecnología.
- Al Dr. Dante Di Gregorio y Dr. Douglas Thomas por el conocimiento y las experiencias compartidas en el área de gestión tecnológica.
- A todo el personal académico y administrativo, contribuyendo a mi formación académica.
- A mis compañeros de la maestría con quienes compartí gratos momentos y experiencias que tendré toda mi vida.

# INDICE

RESUMEN.....	i
SUMMARY .....	ii
DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
I N D I C E.....	v
INDICE DE CUADROS.....	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
1. INTRODUCCÓN .....	1
1.1 Propuesta de Título del Trabajo.....	1
1.2. Objetivo general.....	1
1.2.1 Objetivos específicos.....	1
1.3 Justificación .....	1
1.3.1 Pertinencia.....	5
1.3.2 Importancia del tema.....	6
1.3.3 Factibilidad.....	9
1.4 Contenido .....	9
2. MARCO TEÓRICO .....	11
2.1 Clasificación de los usos en terrenos y edificaciones.....	11
2.2 Análisis de Factibilidad del Sistema de Intercambio Geotérmico.....	11
2.3 ¿Qué es el sistema de intercambio geotérmico? .....	12
2.3.1 Energía geotérmica .....	14
2.3.2 La geotérmica en México.....	15
2.3.3 Sistema de intercambio geotérmico .....	16
2.4 Confort térmico .....	18
2.5 Propiedad Intelectual .....	23
2.6 Factores que determinan un análisis de factibilidad del sistema de intercambio geotérmico. ....	24
2.7 CASOS DE ESTUDIO .....	27
2.7.1 Universidad de Colgate, Nueva York.....	27
2.7.2 Preparatoria Lapwai, Oregon.....	31
2.7.3 Universidad de Chile.....	34
2.8 Factores para realizar un análisis de factibilidad sobre el sistema de intercambio geotérmico en el Edificio de Posgrado de Contaduría y Administración. ....	37
2.9 Modelo Triangular de Adopción de Tecnologías Verdes.....	40
2.9.1 Factores internos de la empresa .....	40
2.9.2 Factores externos a la empresa .....	41
2.9.3 Características de las tecnologías y costos y beneficios de la adopción.....	42
3. MARCO METODOLÓGICO.....	44
FACTOR 1: Elementos descriptivos del caso de estudio .....	46

FACTOR 2: Mapas hidrogeológicos del edificio de posgrado de contabilidad....	47
FACTOR 3: Elección del sistema de intercambio geotérmico.....	47
3.3.1. Elección de la bomba de calor.....	47
3.3.2. Elección de la configuración a emplear.....	48
FACTOR 4: Definición de las cargas de calefacción y refrigeración del edificio de posgrado de contabilidad.....	49
FACTOR 5: Realizar un análisis sobre el costo de inversión, mantenimiento y compararlo con el aire acondicionado convencional.....	50
3.5.1 Capital, costos anuales y costos periódicos.....	50
3.5.2 Comparación de alternativas.....	51
3.5.3 Mantenimiento.....	52
FACTOR 6: Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros.....	52
FACTOR 7: Realizar una simulación.....	52
FACTOR 8: Realizar un análisis cualitativo sobre el beneficio ambiental, ecológico y social.....	53
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>	<b>54</b>
1. Elementos descriptivos del edificio.....	54
2. Mapas hidrogeológicos del edificio de Posgrado de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro.....	57
3. Elección del sistema de intercambio geotérmico.....	60
4. Definición de las cargas de calefacción y refrigeración.....	66
5. Análisis sobre el costo de inversión, mantenimiento y compararlo con el aire acondicionado convencional.....	66
5.1 Análisis económico.....	68
5.2 Capital, costos anuales y costos periódicos.....	69
6. Análisis de sensibilidad de los parámetros.....	71
7. Simulación, con el software disponible.....	72
8. Análisis cualitativo sobre el beneficio ambiental, ecológico y social sobre este sistema de climatización alterna.....	75
8.1 Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero.....	75
8.2 Barreras para la adopción de tecnologías verdes: sistema de intercambio geotérmico.....	75
<b>5. CONCLUSIÓN.....</b>	<b>82</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>86</b>
<b>APENDICE A.....</b>	<b>91</b>

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
1.1	Escenario a futuro de la precipitación total anual y la temperatura media anual del Estado de Querétaro.	7
3.1	Detalles de la estimación de costos del sistema de intercambio geotérmico. Fuente: Elaboración propia.	50
3.2	Comparación económica de los sistemas de climatización. Fuente: Elaboración propia	51
4.1	Cotización del modelo 38CKC048-M-561	63
4.2	Consumo anual de energía y costo de la energía para los sistemas de climatización. Elaboración propia.	67
4.3	Costos del sistema de intercambio geotérmico horizontal. Elaboración propia.	69
4.4	Valor presente y periodo de recuperación. Elaboración propia.	71
4.5	Factores internos. Elaboración propia.	76
4.6	Factores externos. Elaboración propia.	77
4.7	Características de la tecnología ambiental y beneficios de la adopción. Elaboración propia.	79
4.8	Beneficios sociales y ambientales de la adopción del sistema de intercambio geotérmico. Elaboración propia	81

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1.1	El efecto invernadero. Fuente: University College in Canada (1996).	2
1.2	Concentración global atmosférica de CO <sub>2</sub> . Fuente: University of California, La Jolla, United States (1999).	3
1.3	Tendencia global en la temperatura promedio de la superficie. Fuente: School of environmental sciences, climatic research unit, University of East Anglia, United Kingdom (1999).	3
1.4	Impacto potencial del cambio climático. Fuente: United States Environmental Protection Agency EPA (2011).	4
1.5	Tendencia de la temperatura media en el Estado de Querétaro. Fuente: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011).	8
2.1	Modelo esquemático del sistema geotérmico. Fuente: Asociación Geotermia Mexicana (2007).	14
2.2	Modelo esquemático del proceso de subducción. Fuente: Asociación Geotermia Mexicana (2007).	15
2.3	Ubicación de los campos geotérmicos en explotación y no explotados. Fuente: Asociación Geotermia Mexicana (2007).	16
2.4	Confort. Fuente: Calthermic (2010)	20
2.5	Convección. Fuente: Calthermic (2010)	21
2.6	Radiación. Fuente: Calthermic (2010).	21
2.7	Conducción. Fuente: Calthermic (2010).	22
2.8	Edificios de la Universidad de Colgate en Nueva York, con su análisis Hidrogeológico. Fuente: Halfhide, 2009 p.22 y 23.	29
2.9	Ubicación de los mantos acuíferos en las cercanías de la preparatoria de Lapwai. Fuente: Chiasson, 2006 p.11.	34
2.10	Casino Miraflores. Fuente: Fuentes, et al. 2009 p. 37.	34
2.11	Zona térmica en la que se encuentra Valdivia. Fuente: Fuentes, et al, 2009 p. 43.	36
2.12	El modelo triangular de la adopción de tecnologías limpias. Fuente: La adopción y difusión de tecnologías limpias (Del Rio González Pablo, 2003).	40
2.13	Los actores relevantes en el cambio tecnológico ambiental. Fuente: La adopción y difusión de tecnologías limpias (Del Rio González Pablo, 2003).	42
3.1	Diagrama para realizar un análisis de factibilidad del sistema de intercambio geotérmico. Fuente: Elaboración propia.	46
4.1	Edificio de posgrado de contaduría y administración de la	54

	Universidad Autónoma de Querétaro.	
4.2	Planta baja del edificio de posgrado de Contaduría y Administración.	54
4.3	Segundo piso del edificio de posgrado de Contaduría y Administración.	55
4.4	Tercer piso del edificio de posgrado de Contaduría y Administración.	55
4.5	Distribución del aula de clase.	56
4.6	Edificio de Posgrado de Contaduría y Administración	56
4.7	Localización de la Zona Conurbada de Querétaro y los 4 municipios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Querétaro en el estado, con coordenadas extremas.	57
4.8	Mapa geológico, después de Salas C., J. L., Álvarez Manila A., Fernández H. F., García B. J. y Yáñez C., 1986.	58
4.9	Edificio de Posgrado de la Facultad de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro.	59
4.10	Sección estructural del Cerro de Las Campanas, donde se ubica el edificio de Posgrado.	59
4.11	Capas de suelo del edificio de posgrado.	60
4.12	Figura 4.12: Instalación típica del sistema Split. Fuente: Carrier 38CKC air conditioner	61
4.13	Aire acondicionado modelo 38CKC048-M-561. Fuente: Elaboración propia	62
4.14	Aire acondicionado modelo 38CKC024-M-3. Fuente: Elaboración propia.	64
4.15	Sistema de intercambio geotérmico horizontal. Fuente: Chiasson.	65
4.16	Costos del sistema de intercambio geotérmico. Fuente: Chiasson	66
4.17	Análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia	72
4.18	Información del proyecto. Fuente: RetScreen Software.	73
4.19	Datos climatológicos del proyecto. Fuente: RetScreen Software	74
4.20	Cargas de calefacción y enfriamiento. Fuente: RetScreen Software	74
4.21	Análisis GEI. Fuente: RetScreen Software	75
4.22	Análisis GEI. Fuente: RetScreen Software.	75
4.23	El modelo triangular de la adopción de tecnologías limpias. Fuente: La adopción y difusión de tecnologías limpias (Del Rio González Pablo, 2003).	76
4.24	Cadena de valor del sistema de intercambio geotérmico Fuente: Elaboración propia	80

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Propuesta de Título del Trabajo.

Análisis de factibilidad sobre la implementación del sistema de intercambio geotérmico en edificios comerciales del estado de Querétaro

## 1.2. Objetivo general

Analizar la factibilidad de implementar un sistema de intercambio geotérmico en el Edificio de Posgrado de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Analizar la factibilidad de dos alternativas, (aire acondicionado convencional y el sistema de intercambio geotérmico) usando el valor presente y simple payback.
- Comparar los ahorros de energía y los costos incrementales sobre estas dos alternativas de climatización.
- Identificar las posibles limitaciones mediante un modelo triangular de adopción de tecnologías verdes.

## 1.3 Justificación

De acuerdo a los científicos que han analizado el fenómeno del cambio climático, señalan que cada año se tendrá un clima más extremo y fenómenos climáticos más intensos. En general, los veranos serán más cálidos y los patrones de las lluvias se modificarán, dando lugar a lluvias más intensas en algunas partes y lluvias menos frecuentes en otras, aumentando así las sequías. Han concluido que el cambio climático es producto, principalmente, de la actividad humana. El uso intensivo de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gasolinas, diesel, gas natural y los combustibles derivados del petróleo) y la quema y pérdida de bosques son dos de las principales fuentes de este problema.

La Tierra tiene un sistema de control de la temperatura natural. Ciertos gases en la atmósfera causan el efecto invernadero. En promedio, aproximadamente un tercio de la radiación solar que llega a la Tierra se refleja de vuelta al espacio, pero los dos tercios es absorbida por la atmósfera, de la cual la mayoría es absorbida por la Tierra y los océanos. La superficie de la Tierra se calienta y como resultado emite radiación infrarroja. Los gases de efecto invernadero atrapan la radiación infrarroja, por lo tanto esto da pie al calentamiento de la atmósfera. Sin embargo, las actividades humanas están causando que estos niveles de gases en la atmósfera aumenten. Los gases del efecto invernadero se mezclan a través de la atmósfera. En la Figura 1.1, se muestra el resultado del efecto invernadero la cual está representada por una capa.



Figura 1.1. El efecto invernadero. Fuente: University College in Canada (1996).

El CO<sub>2</sub> atmosférico se ha incrementado de una concentración pre-industrial de alrededor de 280 ppmv a 367 ppmv de hoy en día (ppmv=partes por millón por volumen). La curva mostrada en la Figura 1.2 se basa en una media móvil de cien años. Es evidente que el rápido aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> se ha estado produciendo desde el inicio de la industrialización. El aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> se da por los combustibles fósiles.

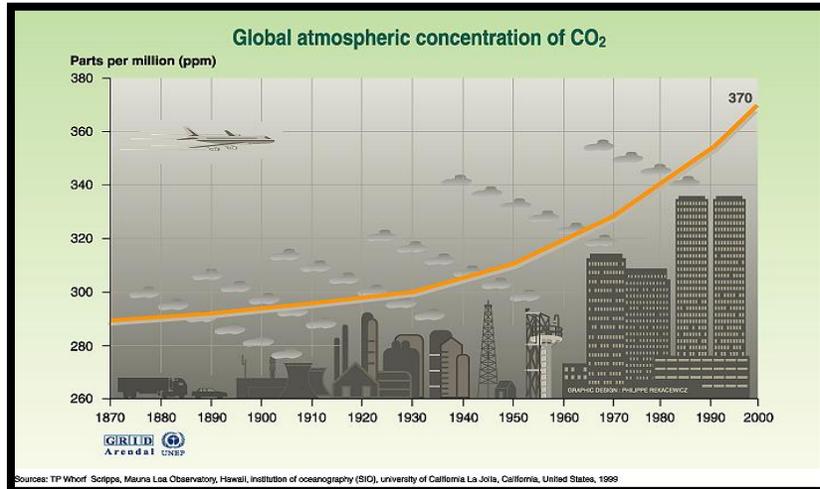


Figura 1.2. Concentración global atmosférica de CO<sub>2</sub>. Fuente: University of California, La Jolla, United States (1999).

La Figura 1.3 muestra la combinación de tierra- aire en la superficie y la temperatura superficial (grados centígrados) desde 1861 a 1998, en relación con la temperatura media de 1961 y 1990. La temperatura media de la superficie del planeta ha aumentado alrededor de 0.3 a 0.6°C, desde finales del Siglo XIX. Y por 0.2 a 0.3°C en los últimos 40 años. Los últimos años están dentro de los más calurosos (de los registros disponibles). El calentamiento es evidente en la superficie terrestre.

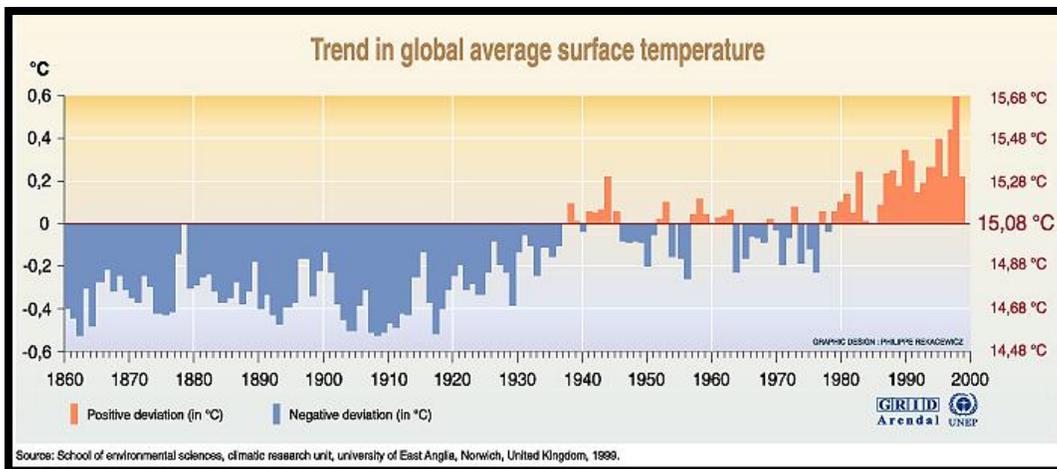


Figura 1.3. Tendencia global en la temperatura promedio de la superficie. Fuente: School of environmental sciences, climatic research unit, University of East Anglia, United Kingdom (1999).

Las emisiones de gas del efecto invernadero, se espera a que lleven a los cambios climáticos en el Siglo XXI más allá. Estos cambios posiblemente tendrán amplias repercusiones en el medio ambiente natural, así como en las sociedades humanas y sus economías. Los científicos han realizado estimaciones de los impactos potenciales, directos en diversos sectores socio-económicos, pero en realidad todas las consecuencias serían más complicadas debido a los efectos en un sector el cual también puede afectar indirectamente a otros sectores. Para evaluar los impactos potenciales, es necesario estimar el alcance y la magnitud del cambio climático, especialmente a nivel nacional y local. Aunque se ha avanzado mucho en la comprensión del sistema climático y el cambio climático, las proyecciones del cambio climático y sus impactos aun contienen muchas incertidumbres, especialmente en los niveles regional y local como se muestra en la Figura 1.4.

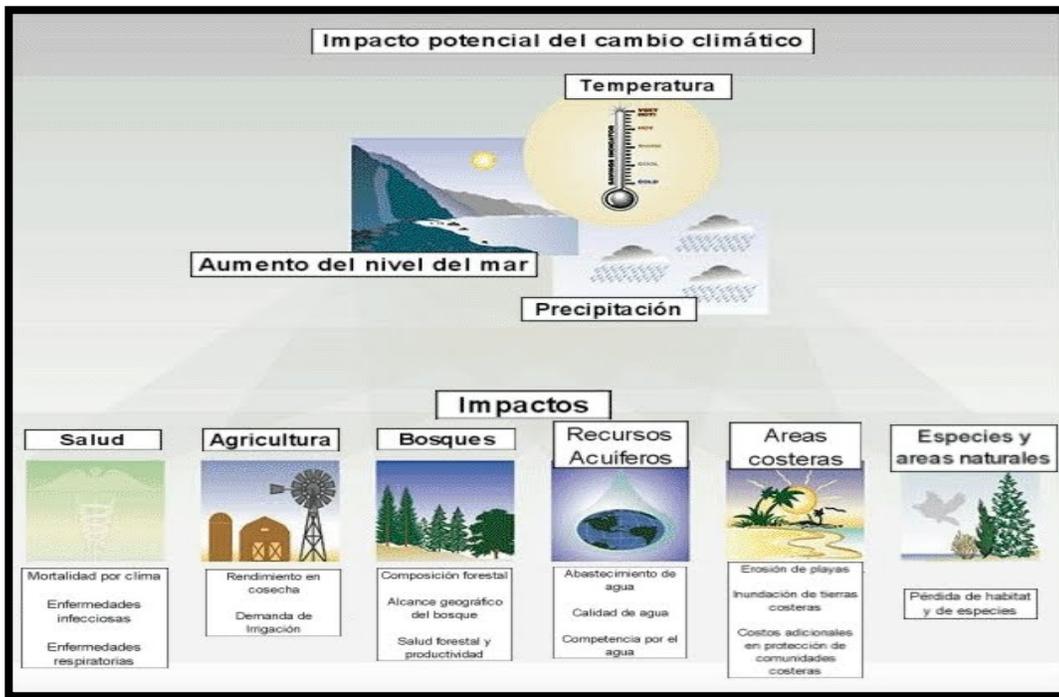


Figura 1.4. Impacto potencial del cambio climático. Fuente: United States Environmental Protection Agency EPA (2011).

### ¿Qué se está haciendo para mitigar el cambio climático?

Ya sea como empresas que deciden reducir sus emisiones o como empresas que ofrecen productos y/o servicios que lo hacen posible, el sector privado juega un

papel muy importante en el proceso de reducción de emisiones de gases de efecto de invernadero. Es muy probable que el clima de México sea entre 2 y 4°C más cálido para el periodo 2020-2080 principalmente en la parte más continental del norte de México.

La elaboración de este proyecto de investigación es conveniente realizarlo para ver si existe una factibilidad de implementación de este sistema de intercambio geotérmico en el Estado, ya que este es un sistema de climatización hace uso del calor de la tierra, proveyendo una temperatura constante dentro de la casa o edificio y el impacto ambiental de este sistema es casi nulo, siendo este un sistema amigable. Es por ello que tiene una gran relevancia social, ya que hoy en día, el tema del cambio climático está en su auge y se busca tecnologías nuevas que minimicen este impacto y que proporcionen un uso, es decir, este sistema sirve para la climatización del hogar y de la misma forma proporciona un ahorro de energía, no tiene contaminantes, etc. Por lo que se podría decir que es un sistema ganar/ganar. Tanto las personas adquieren un sistema de climatización, como el planeta tiene un impacto menor que el aire acondicionado convencional. Una vez hecho el análisis de factibilidad sobre la implementación de este sistema en el Estado de Querétaro, beneficiará a aquellas personas que se interesen en colocarlo en sus hogares u edificios.

### **1.3.1 Pertinencia**

La línea de investigación de la maestría en Gestión de la Tecnología, en la cual recae este trabajo de investigación corresponde a la línea de la prospectiva y difusión de tecnologías, ya que se detectarán y pronosticarán las tendencias tecnológicas que detonen la generación de un nuevo conocimiento. La realización de esta investigación es prospectiva ya que se trata de un estudio para pronosticar la factibilidad de implementación del Sistema de Intercambio Geotérmico en el Estado de Querétaro a través del análisis de ciertos aspectos que influyen en él, con ello podemos obtener un escenario futuro sobre la aplicación de este nuevo conocimiento y de igual forma tener una prospectiva sobre el impacto ecológico y social en un futuro.

Este trabajo de investigación hará la función de *planear* que según el modelo nacional de gestión de la tecnología (2010), esta función tiene como proceso la planeación tecnológica y con ello la elaboración y revisión de un plan tecnológico. En esta función se consideran aspectos tales como: tipo de proyectos, factibilidad técnica, origen de la tecnología, recursos necesarios, etc. Dado esto este proyecto de investigación se realizará mediante un plan de negocio, el cual es una herramienta de reflexión y trabajo que sirve como punto de partida para un desarrollo empresarial, según Stutely “*Un plan estratégico de negocios es aquel plan que expone el método para llevar a cabo cierta actividad en cierto periodo de tiempo.*” (p.8). Lo realiza por escrito una persona emprendedora, y en el plasma sus ideas, el modo de llevarlas a cabo e indica los objetivos a alcanzar y las estrategias a utilizar. Consiste en redactar, con método y orden, los pensamientos que tiene en la cabeza.

Mediante el plan de negocios se evalúa la calidad del negocio en si. En el proceso de realización de este documento se interpreta el entorno de la actividad empresarial y se evalúan los resultados que se obtendrán al incidir sobre esta de una determinada manera, se definen las variables involucradas en el proyecto y se decide la asignación óptima de recursos para ponerlo en marcha.

El planteamiento es sencillo: primero se identifica, describe y analiza de forma clara y concisa, la oportunidad de negocio en la que se desea embarcar. Asimismo, se estudia la viabilidad técnica, se resumen los medios económicos con los que se cuenta y se analizan las posibles fuentes de financiación. Por último se desarrollan los procedimientos y las estrategias para pasar de una idea a un autentico proyecto empresarial, definiendo políticas de marketing, recursos humanos, marco temporal, compras, ventas, tecnológicas, financieras, etc.

### **1.3.2 Importancia del tema.**

En el estado de Querétaro, predomina un clima templado (con temperatura media de 17 a 18°C) subhúmedo, con poca lluvia: 500 a 600 mm anuales. Son frecuentes las heladas invernales en las partes altas de las sierras; la zona más seca se localiza en la cuenca del río Extórax y la más húmeda en la vertiente

oriental de la Sierra Madre. Vientos dominantes del noreste en otoño y del este el resto del año.

Los escenarios de emisiones que proyectan las concentraciones de gases de efecto invernadero (SRES) contemplan diversas hipótesis relativas al desarrollo socioeconómico del planeta. Estos escenarios se clasifican en:

**A1B: Emisiones Media-Alta.** Rápido crecimiento económico regional con la introducción de tecnologías nuevas y eficientes. Existe un balance entre el uso de fuentes de energía fósil y no fósil.

**A2: Emisiones Altas.** Existe crecimiento constante de la población, el desarrollo económico está regionalmente orientado y el cambio tecnológico es muy fragmentado y más lento que en otros escenarios.

**B1: Emisiones Media-Baja.** Misma población global y cambio en las estructuras económicas. Uso de fuentes de energía eficientes y soluciones globales hacia la economía, la sociedad y el ambiente sustentable.

**B2: Emisiones bajas.** Soluciones locales para la economía, la sociedad y el ambiente sustentable. Está orientado hacia la protección ambiental y la igualdad social que se enfoca en niveles locales y regionales.

Tabla 1.1. Escenario a futuro de la precipitación total anual y la temperatura media anual del Estado de Querétaro.

Escenario	Precipitación total anual	Temperatura media anual aumentará
2020	Disminuirá entre 5 y 10%	Entre 0.8 y 1.2°C
2050	Disminuirá entre 5 y 15%	Entre 1.0 y 2.5°C
2080	Disminuirá entre 5 y 20%	Entre 2 y 4°C

Fuente: SEMARNAT (2011).

Según la SEMARNAT se pronostica que la temperatura media anual del Estado de Querétaro irá en aumento a través de los años, como se muestra en la Figura 1.5. El municipio de Querétaro formaría parte de la curva A1B ya que existe un rápido crecimiento económico regional con la introducción de tecnologías nuevas y eficientes.

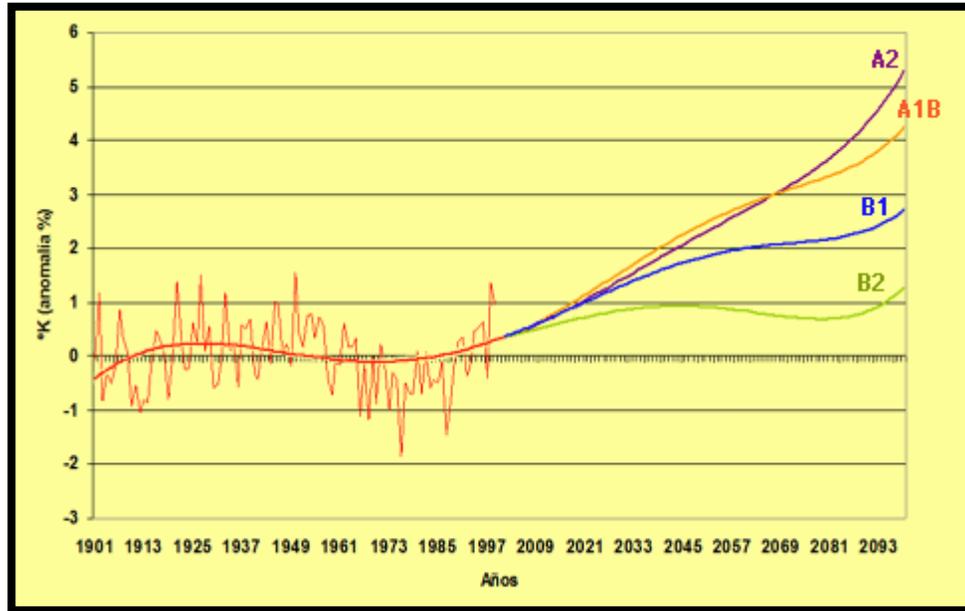


Figura 1.5. Tendencia de la temperatura media en el Estado de Querétaro. Fuente: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011).

Otra aspecto a considerar y muy importante es que el Estado de Querétaro cuenta con un ecosistema de matorral xerófilo, el cual comprende las comunidades arbustivas de las zonas áridas y semiáridas. El clima característico es seco estepario, desértico y con lluvias escasas. Se podría decir que el aumento de la temperatura no es impactante hablando en porcentajes; sin embargo, en el Estado se han registrado temperaturas de hasta 36°C por lo que se está haciendo necesario contar con un sistema de climatización.

Esta investigación pretende analizar si este sistema es factible de implementar y ser una alternativa eficiente de climatización en los edificios queretanos ante el aire acondicionado convencional. Además realizar esta investigación puede dar a conocer esta nueva tecnología ya que es nueva en México y no se han hecho estudios sobre su implementación, por lo que este proyecto podría ofrecer la posibilidad de otras investigaciones en otros estados de la República, ya que en este proyecto se pretende analizar las partes que lo componen, su funcionamiento y costos de implementación. Siendo esto la base para futuras investigaciones.

### **1.3.3 Factibilidad**

Este trabajo de investigación es factible de realizarse dado que se cuenta con la información necesaria del caso de estudio en específico (Edificio de Posgrado de Contabilidad de la Universidad Autónoma de Querétaro), con esta información se podrán realizar los análisis pertinentes de la investigación, los cuales son financieros, beneficios sociales y ambiental. Es posible realizar esta investigación gracias a la información tanto técnica como financiera existente del sistema de intercambio geotérmico y que se podrá aplicar al caso de estudio.

El propósito de esta investigación es realizar el análisis de factibilidad sobre la implementación de este sistema de intercambio geotérmico en los edificios comerciales del Estado, el cual nos permitirá realizar un análisis para ver si es viable o no, así también se pretende analizar mediante el modelo triangular de adopción de tecnologías limpias este sistema de intercambio geotérmico con el propósito de conocer las limitaciones que pudiera tener este sistema.

### **1.4 Contenido**

La presente tesis se encuentra conformada por cuatro capítulos, en los cuales se desglosa y explica todo el proceso de investigación que se llevó a cabo, abarcando tanto la parte teórica como la parte práctica. La introducción se encuentra en el primer capítulo, dividido en justificación, pertinencia, relevancia, factibilidad y contenido, donde se pretende explicar el por qué de la investigación y la importancia de realizar un análisis de factibilidad sobre la implementación del sistema de intercambio geotérmico en edificios comerciales. El capítulo dos contiene el conjunto de definiciones y temas necesarios para la comprensión de la investigación práctica, la cual se encuentra conformada por el marco teórico, en donde se explican temas como la energía geotérmica en México, el sistema de intercambio geotérmico como sistema de climatización, las ventajas y desventajas de dicho sistema y los factores necesarios para realizar un análisis de factibilidad sobre su implementación.

El capítulo tres inicia con la metodología de la investigación, para la recolección de datos. En este capítulo se explica paso a paso qué datos son

necesarios y cómo se debe realizar un análisis de factibilidad sobre la implementación del sistema de intercambio geotérmico en el caso particular del edificio de posgrado de la Facultad de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro.

El capítulo cuatro contiene los resultados, aportaciones y recomendaciones obtenidos de la investigación. Finalmente en la conclusión se da respuesta a las preguntas de investigación que se plantearon en un inicio de acuerdo a lo mostrado en los resultados del análisis de factibilidad.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Clasificación de los usos en terrenos y edificaciones**

Los edificios comerciales son considerablemente más heterogéneos que las viviendas, abarca hospitales, escuelas, oficinas, hoteles, centros comerciales cerrados, etc. (U.S. Department of Energy, 2008).

Según el artículo 51 de las Normas de Uso, de acuerdo con su naturaleza y a efectos del Plan General de Terrenos y Edificaciones se distinguen los siguientes usos:

- Residencial: Vivienda
- Industrial: Industria y almacén.
- Terciario: Comercial, oficinas, hotelero, espectáculos, etc.
- Dotacional: Equipamiento, zonas verdes, comunicaciones.
- Rustico: agropecuario.

El edificio de Posgrado de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro, se considera dentro de los usos comerciales ya que el artículo 56 del capítulo III del uso terciarios, define como uso terciario el que tiene por finalidad la prestación de servicios al público, las empresas y organismos, tales como servicios de alojamiento temporal, comercio en sus diferentes formas, información, administración, gestión, actividades financieras y otras similares.

La sección segunda, en su artículo 57 define el uso comercial como la comprensión de edificios o locales de servicio público destinados a la compra y venta de mercancías de todas las clases incluidos el almacenamiento de estas, así como la prestación de servicios personales al público en general.

### **2.2 Análisis de Factibilidad del Sistema de Intercambio Geotérmico.**

Este documento describe los factores involucrados en el análisis de factibilidad de un sistema de intercambio geotérmico también conocido como sistema de climatización de la Tierra. En él se describe el sistema, las opciones y responde a las preguntas que se podrían tener sobre esta tecnología. Asimismo este documento está diseñado para ayudar a los que desconocen sobre esta

tecnología en la comprensión de los conceptos principales del sistema de intercambio geotérmico (NYSERDA, 2007).

El sistema de intercambio geotérmico no es una tecnología nueva, ha operado con éxito por décadas en una gran variedad de edificios en Estados Unidos y Europa. La tecnología básica ha estado alrededor de más de cincuenta años, pero muchas mejoras se han hecho recientemente, incluyendo los tipos de materiales utilizados, el diseño, los métodos de instalación, la eficiencia de los compresores, bombas y demás. Esta tecnología se puede aplicar tanto en construcciones ya existentes o nuevas, aunque el mejor momento para considerar la instalación de la tecnología del sistema de intercambio geotérmico es cuando la construcción es nueva o cuando se considera la sustitución de un sistema ya existente (aire acondicionado) que ya no cumple con las necesidades de la construcción o ha llegado al final de su vida útil (NYSERDA, 2007).

El propósito de un análisis de factibilidad es estimar y comparar los costos y beneficios de las diferentes alternativas. El estudio debe ir más allá de una simple estimación de costos y beneficios. Se intentará describir y cuantificar las principales diferencias en el funcionamiento y el rendimiento con los sistemas alternativos, a un nivel de detalle que apoye a una decisión sobre la elección del sistema. Asimismo se identificarán los obstáculos y problemas asociados con las alternativas. Se empezará por describir en qué consiste el sistema de intercambio geotérmico y posteriormente se mencionarán dos análisis de factibilidad realizados en diferentes lugares y finalmente se describirá los factores que se analizan al realizar un estudio de factibilidad (NYSERDA, 2007).

### **2.3 ¿Qué es el sistema de intercambio geotérmico?**

El hombre ha conocido y utilizado desde antiguo la energía térmica de la tierra que se manifiesta en forma de manantiales y fumarolas y, también, ha experimentado la fuerza poderosa y destructiva de las erupciones volcánicas. Sin embargo, no es sino hasta el siglo XVII, cuando empieza a interesarse en ella desde una perspectiva científica y con miras a un uso más industrializado. Al excavar pozos para la extracción de carbón, se observó que por lo regular, la temperatura

aumentaba con la profundidad; lo cual era un indicio de que la tierra estaba más caliente en su interior. Sir William Thomson (1824-1907), mejor conocido como Lord Kelvin, intentó calcular la edad de la tierra, mediante un balance térmico. Como condición inicial, consideró que la tierra, al formarse, era una esfera de roca fundida; calculó el tiempo de enfriamiento por conducción requerido para alcanzar el gradiente de temperatura observado en las minas de carbón. Concluyó que la edad de la tierra debía de ser 25 a 400 millones de años. Aunque este resultado es erróneo, porque Kelvin desconocía fenómenos importantes como el decaimiento de minerales radiactivos en el manto terrestre, la actitud científica detrás del hecho es lo que importa.

El inicio de la industria geotérmica lo podemos situar a principios del siglo XIX en Italia, donde se extraía ácido bórico evaporando el agua caliente de los manantiales. Al principio se empleaba leña como combustible. En 1827, Francesco Larderel inventó un proceso de evaporación, usando la energía de la misma agua caliente. Después, se transformó la energía del vapor en energía mecánica, mediante un sistema rudimentario de bombeo del agua con inyección de vapor. Más adelante, se construyeron bombas centrifugas y reciprocantes, así como malacates, accionados por vapor. En 1904, Piero Ginori Conti construyó el primer generador eléctrico accionado por vapor geotérmico.

Por otra parte, en 1882 operó en la Ciudad de Boise, Idaho, EU, el primer sistema de calefacción distrital con energía geotérmica. En 1910 ya se usaba en Toscana, Italia, la energía geotérmica en invernaderos y, en 1928, Islandia empezó sus primeros proyectos de calefacción doméstica con geotérmica. Los primeros pozos para aprovechar la energía geotérmica se perforaron en Japón, en 1919 y en Los Geiser, California en 1921. Italia continuo siendo el país pionero en el uso de la geotermia, especialmente para la generación de electricidad.

Actualmente sabemos, por mediciones sistemáticas y cuidadosas, que el flujo natural de calor del interior hacia la superficie de la tierra, es del orden de 59 a 67 mW/m<sup>2</sup>. Este valor puede incrementarse en zonas termales. Comparado con el calor que la superficie de la tierra recibe el sol, que es del orden de 325 W/m<sup>2</sup> en

la República Mexicana, el flujo de calor geotérmico es muy pequeño (Geotermia solar, 2008).

### 2.3.1 Energía geotérmica

La geotermia es el calor del interior de la tierra que se ha concentrado en ciertos sitios del subsuelo, conocidos como yacimientos geotérmicos. Un yacimiento geotérmico típico se compone de una fuente de calor, un acuífero y la llamada capa sello. La fuente de calor es generalmente una cámara magmática en proceso de enfriamiento. El acuífero es cualquier formación litológica con la permeabilidad suficiente para alojar agua meteórica percolada desde la superficie. La capa sello es otra formación, o parte de ella, con una menor permeabilidad, cuya función es impedir que los fluidos geotérmicos se dispersen totalmente en la superficie. En la Figura 2.1, se muestra un modelo esquemático del sistema geotérmico.

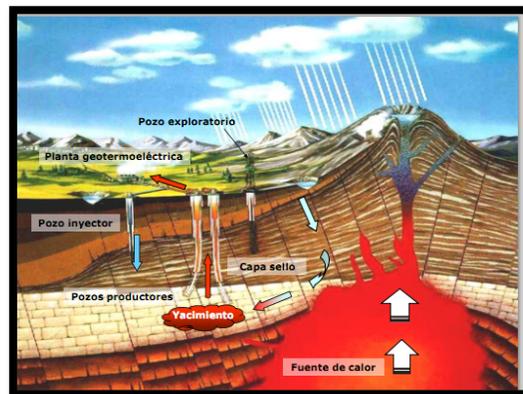


Figura 2.1. Modelo esquemático del sistema geotérmico. Fuente: Asociación Geotermia Mexicana (2007).

Los recursos geotérmicos se localizan preferentemente en los límites entre las diversas placas tectónicas en las que está fragmentada la capa sólida más externa del planeta conocida como litosfera. Particularmente en los límites de tipo convergente, donde chocan entre sí dos placas y una se introduce debajo de la otra en un fenómeno conocido como subducción, es muy frecuente la formación de magmas que eventualmente pueden actuar como fuentes de calor para dar lugar a sistemas geotérmicos. La Figura 2.2 muestra un modelo que esquematiza el proceso de subducción.

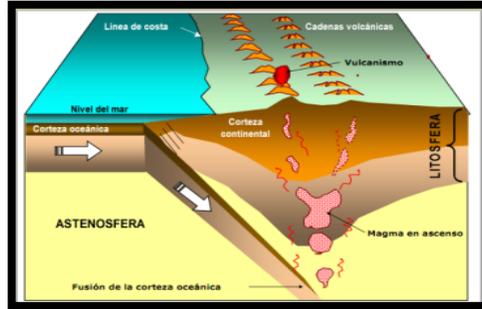


Figura 2.2. Modelo esquemático del proceso de subducción. Fuente: Asociación Geotermia Mexicana (2007).

Como los sistemas geotérmicos se forman preferentemente en los bordes entre placas tectónicas, donde también suelen ocurrir fenómenos de vulcanismo y sismicidad, los países ubicados en o cerca de esos sitios son los que poseen más recursos geotérmicos. Una gran cantidad de países utiliza la geotérmica de manera directa para diversas aplicaciones (calefacción, balnearios, deshidratación de vegetales, invernaderos, secado de madera, bombas de calor, etc.) pero solo 24 países hasta la fecha, la emplean de manera directa para generar energía eléctrica.

Esos países tienen una capacidad geotermoeléctrica instalada total de más de 10 mil megawatts, estando ahora México en cuarto lugar (Geotermia solar, 2008).

### 2.3.2 La geotérmica en México

Hay cinco campos geotérmicos identificados en México, cuatro de los cuales se encuentran bajo explotación con una capacidad total instalada de 958 MW, lo que representa el 2.1% de la capacidad eléctrica total del país operada por la Comisión Federal de Electricidad. En México, la planta de Pathé que debe considerarse como un proyecto experimental más que comercial, estuvo en operación durante 10 años, con una capacidad efectiva del orden de 600 Kw (Geotermia solar, 2008).

La etapa industrial de la geotermia inicio formalmente en el año de 1973, cuando se inauguraron las dos primeras unidades de Cerro Prieto Uno, de 37.5 MW cada una. Por otra parte, el uso de la energía geotérmica en forma directa, en diferentes procesos industriales y en recreación y ambientación de espacios, ha aumentado notoriamente en los últimos años. En 1995 la capacidad disponible

para estas aplicaciones fue 8 664 MW térmicos; mientras que en el 2005 fue de 27 824 MW térmicos. En la figura 2.3 se muestran la ubicación de los campos geotérmicos en explotación y los que aún no han sido explotados (Geotermia solar, 2008).



Figura 2.3. Ubicación de los campos geotérmicos en explotación y no explotados.  
Fuente: Asociación Geotermia Mexicana (2007).

Actualmente se encuentran en construcción dos unidades a condensación de 25 MW que se instalarán en el campo geotérmico de los Humeros, y que deberán entrar en operación en 2012 y 2013. El principal uso de las bombas de calor es el acondicionamiento de espacios habitable o de trabajo. Sirve igualmente como calefacción en invierno y enfriamiento en verano (Geotermia solar, 2008).

### 2.3.3 Sistema de intercambio geotérmico

El sistema de intercambio geotérmico es un sistema de climatización (calefacción y refrigeración) que utiliza la energía renovable de la tierra (Energy Savers 2011), justo debajo de la superficie, puesto que a unos metros bajo la superficie, la temperatura del planeta se mantiene constante durante todo el año, que van desde los 10°C en las latitudes norte (para Estados Unidos) a unos 21°C en el sur del país, en Estados Unidos (Geoexchange, 2011). El sistema de intercambio geotérmico aprovecha esta temperatura constante para proporcionar calefacción y refrigeración de manera eficiente (Geoexchange, 2011). El sistema de intercambio geotérmico se denomina de baja entalpia ya que la energía geotérmica con usos domésticos para generar calefacción, refrigeración y agua

caliente sanitaria (ACS) se le denomina de esta forma (Fórum Geotermia, 2010). En este caso el calor que se aprovecha para la climatización se encuentra a muy poca profundidad, justo por debajo de la corteza terrestre, ya que permite aprovechar el calor que se acumula en el subsuelo por el impacto de los rayos solares, para generar la climatización necesaria en los hogares (Fórum Geotermia, 2010). A partir de los 2 metros de profundidad la temperatura del subsuelo se mantiene constante como lo hemos mencionado anteriormente (Fórum Geotermia, 2010).

En invierno un fluido que circula a través de tuberías enterradas en el suelo absorbe el calor de la tierra y la llevan dentro del hogar, mediante una bomba de calor que concentra la energía térmica de la Tierra, para luego transferirla al espacio interior de la casa. En el verano el proceso se invierte, el calor se extrae del aire de la casa y se transfiere a través de la bomba de calor por medio de la tubería a la tierra, el líquido en el circuito se lleva ese calor y libera aire frío dentro de la casa (Geoexchange, 2011).

Este sistema de aprovechamiento de la energía solar absorbido por la superficie de la Tierra se basa en tres elementos principales: Circuito de intercambio geotérmico con la Tierra, la bomba de calor geotérmica y el circuito de intercambio con la vivienda (Fórum Geotermia, 2010). El sistema de intercambio geotérmico es el más eficiente desde el punto de vista de consumo energético como de ahorro económico (Fórum Geotermia, 2010). Representa un ahorro energético y económico de entre un 60 y un 80% respecto a los sistemas de climatización tradicionales como el gas o el gas-oíl (Fórum Geotermia, 2010). Además es el más eficiente que otras energías renovable como la biomasa o la solar, frente a las cuales representa ahorros económicos y de consumo energético superiores al 50% (Fórum Geotermia, 2010). Las ventajas de este sistema es que no produce ruido, proporciona un confort óptimo, bajo consumo de energía (Rehabitar 2003), es menos contaminante (Revista ecohabitar, 2004), alta duración del sistema (Geotermia solar, 2008). Y las desventajas son los costos de instalación ya que la amortización va de cuatro a ocho años (Geotermia solar,

2008), y la necesidad de espacio para la instalación del sistema (Geotermia solar, 2008).

La Unión Europea (Directiva 2002/91/CE del 16/12/2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios) ha incluido explícitamente a las bombas de calor (sistema de intercambio geotérmico) para calefacción entre los medios para conseguir el cumplimiento de los compromisos del Protocolo de Kioto (Diario Oficial de Comunidades Europeas, 2002). Este tipo de bombas de calor se consideran oficialmente energías renovables en Finlandia, Noruega, Suecia, Suiza, Dinamarca, Francia y Alemania como energéticamente eficientes. Todos estos países conceden ayudas para su instalación en el sector residencial (Rehabitar, 2003). Así mismo este sistema de intercambio geotérmico es reconocido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), quien ha dicho que es uno de los sistemas de mayor eficiencia energética, el medio ambiente limpio y más rentable de climatización disponible en la actualidad (Geoexchange, 2011).

## **2.4 Confort térmico**

El hombre, como los demás seres vivos ha de adaptarse a los límites impuestos por las condiciones climáticas y a las distintas sensaciones que su organismo ha de soportar. Sin embargo, a diferencia de los animales, plantas y demás, el hombre tiene la capacidad, no solo de adaptarse a climas muy variados, sino también la de modificar las condiciones ambientales de su entorno mediante el vestido y la vivienda (Fernández, 1994). Si bien, hoy en día trabajamos en oficinas y nos movemos en automóviles que cuentan con aire acondicionado, sin embargo al llegar a nuestros hogares sufrimos de las inclemencias del clima, abundante frío o abundante calor, calor que no nos deja dormir o poder hacer una vida mucho más placentera dentro de nuestros hogares. Entonces ¿por qué no climatizar nuestras viviendas? Hoy en día existen una gran variedad de equipos de climatización que pueden brindarnos ese confort que tanto buscamos.

El confort térmico es una sensación personal ante un ambiente térmico dado. Según la Norma UNE-EN ISO 7730:1996 (referente a los ambientes térmicos

moderados. Determinación de los índices PMV y PPD y especificaciones de las condiciones para el bienestar térmico) define al confort como “Una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico” (Fuentes. Et al., 2009). Asimismo la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire acondicionado: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) en 1966 definió el confort térmico como “la condición mental en la que se expresa satisfacción con el ambiente térmico (Tornero, et al. 2006). El concepto de confort, por tanto, admite varias definiciones, pero en todas se halla presente el concepto de equilibrio energético entre el cuerpo humano y su entorno (Fernández, 1994).

Como es bien sabido, un ambiente térmico inadecuado puede originar diversos problemas desde incomodidades como la transpiración o temblores a raíz de temperaturas demasiado altas o demasiado bajas hasta alteraciones de salud (Mondelo, 1999). Asimismo causa reducciones de los rendimientos físico, mental y de la productividad, provoca irritabilidad, incremento de la agresividad, de las distracciones, de los errores, incomodidad al sudar o temblar, aumento o disminución de la frecuencia cardiaca etc. Lo que repercute negativamente en la salud (Mondelo, 1999).

Pero ¿cuál es la temperatura ideal en el hogar? Según la NASA en su reporte CR-1205-1 “Compendio de las Respuestas Humanas con el Medio Ambiente Aeroespacial: A Compendium of Human Responses to the Aerospace Environment” señalan que el calor crea estrés, que es mucho más importante cuanto más elevada es la temperatura del ambiente. A medida que la temperatura crece, la actividad de las personas se reduce mucho. Además determinan que no existe una temperatura ideal para el hogar, ya que depende del tipo de actividad, de la forma de vestir y de la propia persona. Sin embargo se recomienda que la temperatura esté comprendida entre los 18 a 22 °C. Ya que a 22°C es la temperatura más agradable en interiores para la gente que realiza trabajos sedentarios, a 21°C es la temperatura ideal para los trabajos mentales y 18°C es la temperatura ideal para que las personas que realiza trabajos activos se sienta confortable aunque las personas inactivas se sientan un poco incómodas (NASA,

CR 1205-1). Cabe mencionar que las preferencias de la gente en lo que respecta la temperatura varían considerablemente de unas persona a otra, con lo que nunca se tendrá a todo el mundo contento, sea cual sea la temperatura que se seleccione (NASA, 1976).

La definición que le otorga la Real Academia Española a la palabra confort, está relacionada con la comodidad y el bienestar del cuerpo, por lo tanto éste se vincula en especial con las funciones del cuerpo que puedan verse afectadas, como la audición, la visión, el sistema nervioso o los problemas articulares generados por el exceso de vibraciones. Hablar entonces de confort significa eliminar las posibles molestias e inconformidades generadas por distintos agentes que intervienen en el equilibrio de la persona (Calthermic, 2010).

El confort se mide como la diferencia entre la temperatura ambiente y la corporal. Cuando la temperatura de la habitación es uniforme, es decir, no existen diferencias de temperatura entre las paredes, la parte alta y la parte baja de la habitación, el confort es máximo. Se considera que existe confort cuando la diferencia de temperatura son menores de 3°C. Cuando mayor sea la diferencia de temperatura menor es el confort tal como se muestra en la Figura 2.4.

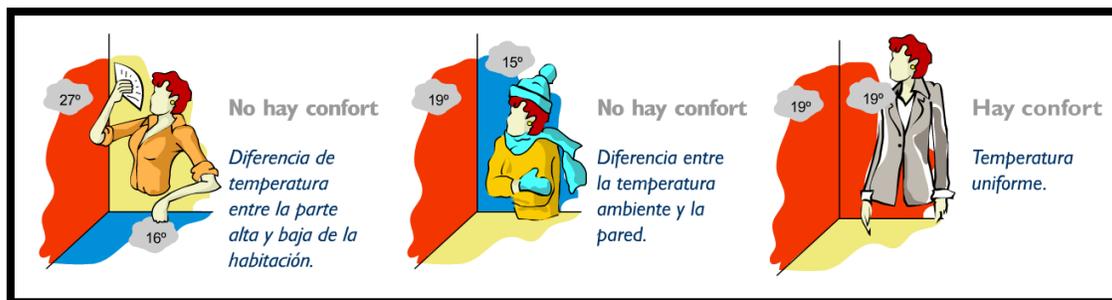


Figura 2.4. Confort. Fuente: Calthermic (2010).

El confort de la persona se mide en función del intercambio térmico existente entre el cuerpo y el ambiente. Cuando menos intercambio de calor, mayor es el confort.

Estos intercambios se producen en la piel y son de tres naturalezas:

1. Convección: contacto con la piel- aire. Es el transporte de calor a través del aire. El aire caliente sube y el frío baja. Es la forma de calentar que tienen

los convectores. Hay diferencia de temperatura entre la parte alta (caliente) y baja (frio) de la habitación. Como se muestra en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Convección. Fuente: Calthermic (2010).

2. Radiación: todos los cuerpos emiten radiación. Esta radiación se transfiere de cuerpos calientes a fríos hasta que se logra de cuerpos calientes a fríos hasta que se logra el equilibrio. No hace falta el contacto para que se produzca este fenómeno. Esta es la forma de calentar que tiene el sol y con la que se logra mayor confort. Como se muestra en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Radiación. Fuente: Calthermic (2010).

3. Conducción: transmisión de calor contacto entre la piel y un objeto. El calor se transmite a través de la masa del propio cuerpo, como por ejemplo, las

mantas eléctricas, o bolsas de agua caliente. La Figura 2.7, muestra un esquema sobre la conducción.



Figura 2.7. Conducción. Fuente: Calthermic (2010).

Un ambiente térmicamente ideal es aquel en el que los ocupantes no expresan ninguna sensación de calor o frío. La condición es un estado neutro en el cual el cuerpo no necesita tomar ninguna acción en particular para mantener su propio balance térmico. La temperatura neutra de la piel es alrededor de 33°C y las sensaciones de calor o frío son producidas cuando la temperatura ambiente está sobre o debajo de ésta. Los principales factores que afectan la sensación de confort son: temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del aire, humedad relativa, nivel de ropa y grado de actividad. Cualquier cambio en ello nos provoca las diferentes sensaciones de confort.

El problema de la aclimatación se resuelve con la implementación de equipos de aire acondicionado o de calefacción central, aunque no todas las personas tienen la misma sensación térmica (Calthermic, 2010).

Como se ha mencionado la temperatura recomendada dentro del hogar es entre 18 y 22 °C, el Estado de Querétaro cuenta con un clima seco que predomina la mayor parte del Estado, con excepción del norte donde se registra un clima templado, moderado y lluvioso por lo que su temperatura media es de 18°C. (SEMARNAT, 2010).

El Estado de Querétaro cuenta con cuatro vulnerabilidades proyectadas hacia el futuro:

1. El agua ya que se encontrará con una presión media (20-40%) del recurso del agua para el 2025 (INE-SEMARNAT, 2011).

2. Los centros urbanos ya que existe una alta concentración demográfica, industrialización, incremento de vehículos e incremento de población con niveles de pobreza extrema (Aguilar, 1995).
3. Vegetación los cambios en la temperatura (+2°C) y precipitación (-10%) favorecerán los climas cálidos (Villers, 1995).
4. Desertificación el 50% de la superficie se verá afectada por desertificación bajo el cambio climático (SEMARNAT, 1997).

Dado las proyecciones anteriores sobre el futuro del Estado de Querétaro, principalmente la vulnerabilidad tres, la cual hace referencia al cambio en la temperatura (+2 °C), consecuencia del cambio climático, que según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (en su artículo 1 definiciones 1992), lo puntualiza como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmosfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (Instituto Nacional de Ecología, 2011) por lo que cada vez será más indispensable contar con un sistema de climatización. Para ello como se ha mencionado anteriormente existen una gran variedad de sistemas de climatización como ventiladores de techo, aislantes térmicos, aire acondicionado, sistema de intercambio geotérmico, etc. El sistema de intercambio geotérmico puede representar una opción viable para la climatización del hogar.

## **2.5 Propiedad Intelectual**

Este sistema de intercambio geotérmico, se encuentra registrado ante la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) por primera vez, la fecha de publicación fue en el 2000 y el inventor corresponde a Hardin, James R. de Indianápolis, Estados Unidos. En la actualidad existen 74 patentes registradas ante la OMPI, la cual están clasificadas con F24J (producción o utilización del calor no previsto en otro lugar), cabe resaltar que en el 2011 se registraron 14 patentes referentes al sistema de intercambio geotérmico (OMPI, 2011).

El sistema de intercambio geotérmico está muy extendido en varios países de Europa, comenzó en Suecia y en el centro de Europa (Austria, Alemania y Suiza),

para desarrollarse posteriormente en otros países como Finlandia, Francia y Benelux (Pérez, 2011). El índice de penetración demuestra que en Suecia es el mercado donde mayor éxito ha tenido, ya que existen 33 sistemas de intercambio geotérmico por cada 1,000 habitantes, se han instalado más de 200,000 unidades, se calcula que en la actualidad, el 40% de las casas unifamiliares tienen este sistema (Pérez, 2011). En otros países europeos este índice también es elevado, como Finlandia, Suiza y Austria donde cuentan con 8, 7, y 5.5 sistemas de intercambio geotérmico por cada 1,000 habitantes respectivamente (Pérez, 2011). En España hay instalados unos 3,000 sistemas de intercambio geotérmico y se espera que en 2012 se instalen 2,000 sistemas (Pérez, 2011). Para el 2005 se instalaron más de 650,000 sistemas de intercambio geotérmico en Estados Unidos (Geoexchange, 2009). En Austin, Texas 48 primarias, 4 secundarias y 3 colegios comunitarios han sido equipados con el sistema de intercambio geotérmico (Lienau, et al. 1995).

## **2.6 Factores que determinan un análisis de factibilidad del sistema de intercambio geotérmico.**

El propósito de un análisis de factibilidad es estimar y comparar los costos y beneficios de las diferentes alternativas contra el sistema de intercambio geotérmico, sin embargo, el estudio debe ir más allá de una simple estimación de costos y beneficios. En el análisis de factibilidad, se intenta describir y cuantificar las principales diferencias en el funcionamiento y el rendimiento con los sistemas alternativos, a un nivel de detalle que apoye a una decisión sobre la elección del sistema. Asimismo se identifican los obstáculos y problemas asociados con las opciones. El enfoque de realizar un estudio de factibilidad varía según el tiempo de investigación, el presupuesto, las herramientas, la habilidad del investigador y la experiencia (NYSERDA, 2007).

El primer paso en el estudio de factibilidad es entonces, definir el alcance del estudio, el nivel de detalle necesario para apoyar las decisiones y los sistemas mecánicos que serán considerados. En términos generales, el nivel de detalle requerido para el análisis de factibilidad debe coincidir con el rigor de la toma de

decisiones. A un costo relativamente bajo, el estudio se puede realizar utilizando “reglas de oro” para los componentes de costo típico, los costos actuales de energía, los parámetros (si se usa un software), las horas dedicadas, el tiempo de construcción, etc. y es necesario que la decisión la tomen personas que estén facultados (NYSERDA, 2007).

Dicho análisis comienza con un modelo detallado por hora del consumo de energía de la casa propuesta, utilizando detalles de la construcción, los programas de operación y las tarifas de energía. También se podría incluir el rendimiento HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning: Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado) mediante datos y estimaciones detalladas de la adquisición de equipos y costos de instalación. El estudio también podría tratar de identificar los obstáculos técnicos, tales como la cantidad de espacio disponible o la existencia de perforaciones difíciles así también las ventajas de la implementación de un sistema de intercambio geotérmico (NYSERDA, 2007).

El primer elemento de HVAC es definir las cargas de calefacción y refrigeración. A diferencia de los sistemas tradicionales de climatización que tengan en cuenta sólo la calefacción y el pico de las cargas de enfriamiento, los métodos para estimar estas cargas son: el uso de datos de otros edificios u hogares, las estimaciones de facturas de servicios públicos, el costo de las horas pico de energía, este tipo de análisis determina el esfuerzo necesario para calcular las cargas de calefacción y enfriamiento del hogar (NYSERDA, 2007).

El siguiente elemento de estudio es la definición y la descripción de los sistemas de intercambio geotérmico, además de proporcionar una visión conceptual de cada sistema, las descripciones incluyen detalles sobre el sistema principal, características y elementos que se incluirán en el análisis. Esta sección también describe suposiciones acerca de cómo el sistema será operado más de un año (caldera, control de ventilación, etc.) (NYSERDA, 2007).

En el estudio se toman en cuenta los precios de energía, teniendo en cuenta las tasas reales, ya que a menudo varían dependiendo de la demanda. El impacto suele resultar en un menor precio de energía eficaz sobre una base \$/kWh. El estudio debe usar la mayor cantidad de información de apoyo como sea posible

para minimizar la influencia de supuestos. Un análisis de sensibilidad sobre los parámetros se espera que tengan un impacto significativo en las cargas ya que puede mostrar el impacto de la incertidumbre en las tasas de ventilación, iluminación, ocupación y horarios. Estos parámetros junto con el tamaño del hogar, y los detalles de construcción son los principales elementos que se pueden personalizar para un análisis de factibilidad específico (NYSERDA, 2007).

Los resultados de las simulaciones de energía se concentran en las cargas de calefacción y refrigeración, el consumo de energía y los costos de energía. Estas ayudan a resaltar las diferencias entre los sistemas (sistema de intercambio geotérmico, calefacción, refrigeración, etc.). Existen varias herramientas de software disponibles para analizar el tamaño de la instalación para el sistema de intercambio geotérmico, estas herramientas han sido desarrolladas en diferentes universidades tales como la Universidad de Alabama o la Universidad de Lund, en Suecia. Un estudio en Oak Ridge National Laboratory realizó una comparación de estas herramientas de software y el enfoque de cada una, en una serie de documentos técnicos. De este estudio se puede resaltar lo siguiente, el software 3GCHPCalc está basado en una plataforma DOS y es el más usado en Estados Unidos, además aceptado por la ASHRAE (NYSERDA, 2007).

Otro factor que se toma en cuenta es un test de conductividad térmica, la conductividad térmica del suelo, donde el sistema de intercambio geotérmico va a ser instalado es el factor determinante para la longitud total (numero de vueltas y la profundidad optima) para satisfacer las necesidades de calefacción y refrigeración. Un análisis de factibilidad bastante completo se puede realizar utilizando métodos alternativos de estimación de la conductividad del suelo sin necesidad de invertir en una prueba de diámetro y un análisis de suelo, si existiera algún sistema de intercambio geotérmico instalado muy cerca del lugar, se puede tomar las pruebas anteriores (NYSERDA, 2007).

El siguiente factor a evaluar es costo de capital, las estimaciones de los costos de capital por lo general provienen de proyectos similares. La falta de instalaciones del sistema de intercambio geotérmico puede tener incertidumbre en el análisis, pero puede ser contrarrestada mediante la comparación de las

estimaciones de otros proyectos. El punto más importante sobre las comparaciones de costos es mantener la coherencia en las fuentes de información entre las alternativas. El costo no solo depende en las cargas del edificio sino también en la geología del lugar. El último paso es la toma de decisiones, un sistema de intercambio geotérmico a menudo requiere un esfuerzo adicional por parte del propietario y del ingeniero. El costo debe estar justificado por los beneficios de costo de operación y satisfacción de los ocupantes, se necesita tiempo para investigar y exponer los argumentos para elegir un sistema de intercambio geotérmico ya que la falta de experiencia del sistema a menudo añade un elemento de incertidumbre (NYSERDA, 2007). El nivel de conocimientos de los tomadores de decisiones deben ser consideradas al definir el alcance de estudio. El fondo de la toma de decisiones se toma en cuenta temas como facilidad de funcionamiento, impacto ambiental, costo de la propiedad, satisfacción de los ocupantes, etc. una vez que un análisis de factibilidad se ha completado con éxito, el siguiente paso en el procedimiento de un sistema de intercambio geotérmico es recopilar la información del sitio para proceder con el diseño final y seleccionar el método de entrega de la instalación (NYSERDA, 2007). A continuación se mencionan diferentes casos de estudio, en donde se implementó el Sistema de Intercambio Geotérmico.

## **2.7 CASOS DE ESTUDIO**

### **2.7.1 Universidad de Colgate, Nueva York**

Un análisis de factibilidad del sistema de intercambio geotérmico se realizó en la Universidad de Colgate, Nueva York (Halfhide, 2009). El primer factor que analizaron fueron **costos**, identificaron que los costos iniciales asociados con la instalación del sistema de intercambio geotérmico eran altos, estos incluían excavación, materiales, costos de construcción de la instalación de las tuberías y demás unidades mecánicas necesarias, y la compra de la bomba de calor (Halfhide, 2009). Con base en datos obtenidos de Hamilton College, se estima que la mano de obra, tuberías, bomba de calor, etc. tenga un costo de \$29, 875 dólares aproximadamente (Halfhide, 2009). Si bien el costo inicial puede ser

mayor en comparación con otros sistemas de climatización con capacidades similares, los sistemas de intercambio geotérmico tienen costos muchos más bajos de operación y de mantenimiento (Halfhide, 2009). Uno de los costos que deben tenerse en cuenta es la energía de las bombas de calor que se requiere para comprimir y distribuir el líquido a través de las tuberías (Halfhide, 2009). Las estimaciones realizadas sugieren acerca de un plazo de amortización de treinta años, pero estos cálculos no incluyen los beneficios sociales y ambientales, ya que estos beneficios son de carácter cualitativo y no se incluyen en los cálculos cuantitativos de los costos (Halfhide, 2009). El segundo factor a evaluar es la **electricidad** aunque no se pudo determinar la cantidad exacta de energía eléctrica requerida y por lo tanto los costos exactos relacionados a ellos no se conocen. Las pruebas y la primera instalación de un sistema de intercambio geotérmico en el campus ayudara a sacar a la luz los verdaderos costos y beneficios (Halfhide, 2009).

El tercer factor a estudiar fue la **geología** de la Universidad de Colgate, el sistema de intercambio geotérmico requiere de una profundidad de 10 y 150 metros dependiendo del tipo de sistema y la geología local. Factores tales como la profundidad de la roca, acuíferos y el gradiente de temperatura, juegan un papel muy importante en la profundidad requerida y del costo de la excavación (Halfhide, 2009). A continuación en la Figura 2.8 se muestra la distribución de la Universidad de Colgate y su análisis hidrogeológico.

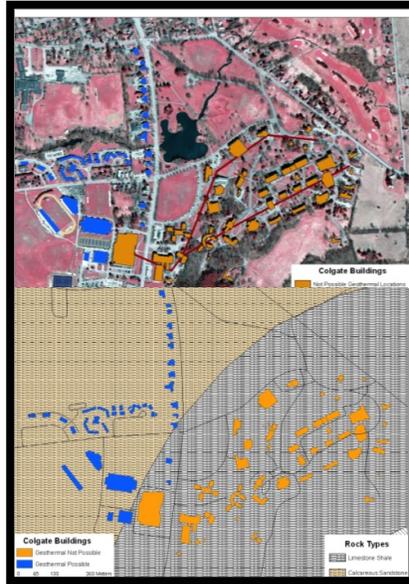


Figura 2.8: Edificios de la Universidad de Colgate en Nueva York, con su análisis Hidrogeológico. Fuente: Halfhide, 2009 p.22 y 23.

El cuarto factor fue la **valoración de los beneficios**, ya que como mucho de los beneficios son cualitativos y que los costos son cuantitativos, se toma en cuenta que los beneficios cualitativos son sociales y ambientales, así como también los beneficios financieros todos estos determinarán una mayor efectividad en costos y tiempo de recuperación de la inversión. Existen varios métodos para valorar los beneficios cualitativos (Halfhide, 2009). La valoración basadas en encuestas intentan cuantificar la disposición total a pagar por la reducción de emisiones de carbono o disponibilidad total para aceptar las consecuencias si no se produce la reducción de emisiones de carbono (Halfhide, 2009).

Con los gastos financieros a un lado, la tecnología del sistema de intercambio geotérmico es atractiva por muchas razones, un factor importante es su contribución a la reducción de emisiones de dióxido de carbono, ya que es una de las causas del cambio climático. Si suponemos que los individuos valoran esta protección del medio ambiente trans-generacional, se debe tener en cuenta esta valoración de los bienes no monetarios del medio ambiente en el análisis costo-beneficio (Halfhide, 2009). Es más práctico instalar el sistema de intercambio geotérmico en instalaciones nuevas que adaptarlo a construcciones ya hechas. Es por ello que la Universidad de Colgate decidió hacer un nuevo centro de fitness y

además obtener la certificación de Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental: Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), donde cada edificio se evalúa en un sistema de puntos verdes, la reducción de la contaminación lumínica y el uso de materiales reciclados y cuando se trata de eficiencia energética LEED otorga hasta 35 puntos. Un sistema de intercambio geotérmico tiene el potencial de recibir hasta 19 puntos por optimizar la eficiencia energética, 7 puntos por ser una energía renovable y 2 puntos por ser una energía verde (Halfhide, 2009). No solo el uso de un sistema de intercambio geotérmico tiene beneficios no monetarios y ayuda en la iniciativa de carbono neutral en la Universidad de Colgate sino también tiene beneficios educativos, ya que las clases académicas en Geología, Geografía, y Estudios Ambientales podrían ser en el edificio con el sistema y aprender más acerca de las energías renovables (Halfhide, 2009). También podría tener otros beneficios para la Universidad como mejorar la reputación nacional de Colgate, puede ser más atractivo para los futuros estudiantes, etc. estos son todos los beneficios no monetarios que deben ser considerados en la toma de decisiones para la implementación del sistema de intercambio geotérmico (Halfhide, 2009).

En el análisis de factibilidad del sistema de intercambio geotérmico realizado para la implementación en la Universidad de Colgate también se tomó en cuenta las barreras potenciales de la implementación del sistema en la Universidad, las cuales fueron: los costos iniciales de instalación del sistema de intercambio geotérmico y la excavación exploratoria; el reglamento del poblado de Hamilton tiene una forma de mantener el consumo de electricidad y como no cuentan con un sistema de climatización, al implementar el sistema de intercambio geotérmico se considera que tenga el potencial de aumentar el consumo de electricidad, pudiendo ser una barrera (Halfhide, 2009). De esta forma la Universidad de Colgate reunió la información necesaria y realizó su análisis de factibilidad para que con ello el siguiente paso fuera tomar la decisión de implementarlo o no.

Con este análisis se concluyó que el sistema de intercambio geotérmico era más factible implementarlo en edificios auxiliares que en el campus central, además su mayor potencial se encuentra en las casas propiedad de la

Universidad ubicadas en la calle Broad, debido a las fuentes de energía existentes. Aunque los costos iniciales de instalación del sistema de intercambio geotérmico pueden ser mayores que los costos de instalación de los sistemas tradicionales de climatización, este sistema será rentable en un plazo mínimo, generará beneficios sociales y ambientales (Halfhide, 2009). La geología de la Universidad de Colgate permite que la energía geotérmica sea factible en estos edificios debido a su ubicación de arenisca y un acuífero confinado (Halfhide, 2009).

### **2.7.2 Preparatoria Lapwai, Oregon**

El segundo ejemplo de análisis de factibilidad se realizó para la preparatoria Lapwai, en Oregon, por el Instituto de Tecnología de Oregon, los factores que tomaron en cuenta para realizar el estudio fueron: las consideraciones del sistema de intercambio geotérmico comparándolo con el sistema convencional, las condiciones geológicas y el diseño del sistema de intercambio geotérmico, también se tomó en cuenta el consumo anual de energía y los costos de operación, realizaron un análisis económico, un análisis de gases de efecto invernadero y por último llegaron al análisis de toda la información y a la toma de decisiones (Chiasson, 2006). A continuación se mostrará qué analizaron para cada factor antes mencionado.

El primer factor fue la comparación del sistema de intercambio geotérmico contra el sistema convencional, este último se compone de un Split y de unidades en la azotea de la escuela, este sistema tiene una capacidad del 64% de enfriamiento de todo el edificio y la marca que usan es Carrier. Es posible usar las mismas instalaciones para implementar el sistema de intercambio geotérmico, cambiando las tuberías y cubriendo los costos adicionales (equipo y mano de obra) (Chiasson, 2006).

El segundo factor fue el análisis de las condiciones geológicas, en el determinaron que existen aguas subterráneas en el área de Lapwai donde su temperatura es de 14°C y se encuentran a una profundidad de 56 a 64 metros (Chiasson, 2006). El tercer factor fue diseñar el sistema de intercambio geotérmico

que mejor se adapte, para ello fue necesario conocer las propiedades geológicas, térmicas, hidráulicas y materiales del subsuelo del lugar, dado que en Lapwai existen mantos acuíferos se determinó que se utilizaría un sistema de lazo abierto que consta de dos loops (vueltas) separados por un intercambiador de calor de placas de acero inoxidable que aísla el agua subterránea de la bomba de calor (Chiasson, 2006).

El cuarto factor fue el consumo anual de energía y los costos de operación, para realizar el estudio usaron la herramienta de software llamada DOE-2, en donde estimaron el costo anual de energía de un sistema convencional y el sistema de intercambio geotérmico, determinaron que usando un sistema convencional el costo anual de energía sería de \$25,966 dólares, mientras que el costo anual de energía el sistema de intercambio geotérmico sería de \$8,086 dólares (Chiasson, 2006).

El quinto factor fue realizar un análisis económico, en el tomaron en cuenta el Valor Presente (VP) del ciclo de vida de 50 años, y un simple enfoque de recuperación de la inversión, estas dos fueron elegidas para la comparación de las alternativas del sistema. Los costos del ciclo de vida incluyen los costos del capital (o costos iniciales), los costos anuales (incluidos los costos de operación y mantenimiento) y los costos periódicos (como costos de reposición). El costo de capital y ahorro de energía del sistema de intercambio geotérmico son utilizados para estimar un periodo de recuperación simple. Como existe cierta incertidumbre en la predicción de los costos, se realizó un análisis de sensibilidad para cuantificar el efecto de los elementos de costo en la recuperación de la inversión (Chiasson, 2006).

Como sexto factor, realizaron un análisis de gases de efecto invernadero, las emisiones de gases de efecto invernadero se ha atribuido a diversos impactos negativos sobre la calidad del aire y los patrones climáticos globales. Se utilizó el software RETScreen (NRC, 2005) para estimar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, para la zona de Lapwai la electricidad es generadas por fuentes hidroeléctricas, por lo que el sistema de intercambio geotérmico se consideraría 100% renovable (Chiasson, 2006). Estos seis factores sirvieron para

tomar una decisión sobre la implementación en la preparatoria Lapwai. Con ello llegaron a las siguientes conclusiones:

- La porción del sistema de intercambio geotérmico que va dentro del edificio tiene un costo competitivo en comparación con el sistema convencional e incluso puede ser más bajo dependiendo de las ofertas actuales.
- La hidrogeología de la zona de Lapwai es muy adecuada para un sistema de intercambio geotérmico, con una perforación de 91.44 metros.
- El costo total del sistema de intercambio geotérmico se estima en \$114,660 dólares.
- El sistema de intercambio geotérmico puede ser operado con un ahorro de energía anual de alrededor de \$17,880 dólares.
- El sistema de intercambio geotérmico tiene un ciclo de vida de 50 años, costo que es 33% menor que la alternativa de un sistema convencional.
- El sistema de intercambio geotérmico tiene un periodo de recuperación simple de 6.5 años. Aunque un cambio del 20% de ahorro de energía, el costo del capital del sistema de intercambio geotérmico altera la recuperación simple a 1.5 años.
- La implementación de un sistema de intercambio geotérmico en la preparatoria de Lapwai, se estima para reducir potencialmente las emisiones anuales de gases de efecto invernadero en 60 toneladas de CO<sub>2</sub> por año.

Estos son dos ejemplos claros de los factores que se toman en cuenta para realizar un análisis de factibilidad, a continuación se retoman los pasos o factores a seguir de manera genérica. En la Figura 2.9 se muestra la ubicación de la preparatoria Lapwai y de sus mantos acuíferos que se utilizaron para su análisis de factibilidad.



Figura 2.9: Ubicación de los mantos acuíferos en las cercanías de la preparatoria de Lapwai. Fuente: Chiasson, 2006 p.11.

**2.7.3 Universidad de Chile**

La Universidad de Chile realizó un proyecto sobre la implementación de un sistema de climatización para el casino Miraflores, mediante la bomba de calor (también llamado sistema de intercambio geotérmico). El Casino de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Austral Campus Miraflores (Figura 2.10), se destina principalmente como sala de estar y comedor para los estudiantes de esta casa de estudios, en el horario de medio día, beneficio con que cuentan gran mayoría de los alumnos de este campus (Fuentes, et al. 2009).



Figura 2.10: Casino Miraflores. Fuente: Fuentes, et al. 2009 p. 37.

La edificación se caracteriza por estar constituida mayoritariamente por ventanales, además la mayor parte de los metros construidos, se encuentran con que sus pisos son ventilados. Las principales características de la edificación son también sus mayores debilidades, correspondiendo estas a una problemática del lado del aislamiento térmico. Hoy en día la situación actual del casino es crítica, vista desde la perspectiva de las personas que frecuentan esta edificación, la evolución de la población, exige día a día más cantidad de confort, lo que la edificación no ofrece (Fuentes, et al, 2009).

El primer factor que tomaron en cuenta fue describir los cerramientos arquitectónicos del Casino, en esta parte se obtuvieron los siguientes datos:

- La superficie vidriada,
- La superficie del techo.
- Superficie del piso.

Estos se analizaron con el fin de obtener los coeficientes de transferencia de calor en el Casino.

El segundo factor fue analizar el sistema de calefacción actual y encontraron que el Casino Miraflores usa una calefacción marca Bosca Modelo Gold 800, encontraron que este tipo de calefacción no era el adecuado, ya que no proporcionaba la carga térmica que es requerida para ofrecer el confort en la edificación además de este sistema de calefacción usan leña para la chimenea, produciendo contaminación del aire (Fuentes, et al, 2009).

El tercer factor que analizaron fue revisar los elementos constructivos con la Normativa de Chile, el País por su condición geográfica consta de un clima muy variado (Figura 2.11), por ello en la Normativa Térmica de Chile NCh853 Of 91, se encuentra subdividida en siete zonas térmicas, lo que se define según la localidad de emplazamiento de la edificación, encontrándose Valdivia, situada en la zona No. 5, según los planos de zonificación térmica aprobados por resoluciones del Ministro de Vivienda y Urbanismo incluye, pisos ventilados, muros perimetrales y vidrios. Es por ello que se obtuvieron los coeficientes de Transferencia de calor antes mencionados, en este punto encontraron que era necesario reemplazar los vidrios de los ventanales y contar con un aislamiento en el piso. Con la nueva

propuesta del cambio de materiales se recalcularon los coeficientes de transferencia de calor y en base a esto se eligió la bomba de calor más apta para el Casino (Fuentes, et al, 2009).

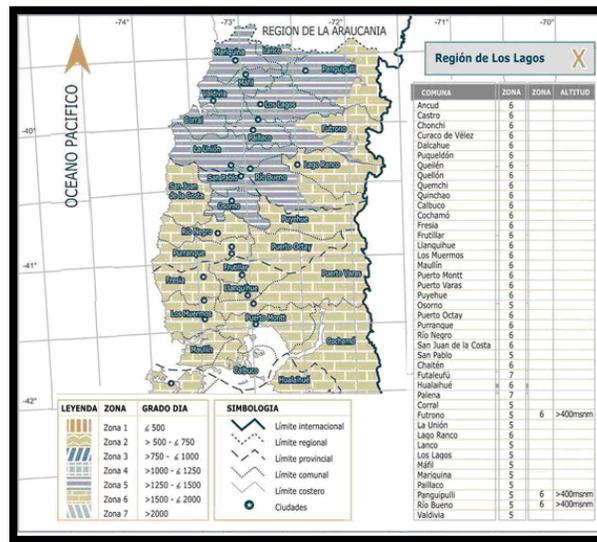


Figura 2.11: Zona térmica en la que se encuentra Valdivia. Fuente: Fuentes, et al, 2009 p. 43.

El cuarto factor fue elegir la bomba de calor, se eligió de la marca Hitecsa modelo WCHBZ 501 la cual corresponde a una bomba de calor unitaria compacta agua/aire de forma horizontal lo que reúne las condiciones para su funcionamiento (Fuentes, et al, 2009).

El quinto factor para el análisis de factibilidad fue realizar el presupuesto de climatización del Casino Miraflores, realizaron los siguientes presupuestos:

- Instalación del sistema de abastecimiento de agua.
- Fabricación e instalación de ductos y bomba de calor.
- Presupuesto de aislamiento y cambio de elementos de la edificación.
- Presupuesto de administración y varios.

Con ello obtuvieron que el costo total por implementar el sistema de climatización con bomba de calor era de \$24,635,967.00 (Fuentes, et al, 2009).

Con ello concluyeron que con los resultados obtenidos era factible tanto técnicamente como económicamente la implementación del sistema de bomba de calor agua/aire, ya que no involucraba grandes inversiones y si proporciona

grandes beneficios como la eficiencia energética que es muy superior al sistema actual (Fuentes, et al, 2009).

## **2.8 Factores para realizar un análisis de factibilidad sobre el sistema de intercambio geotérmico en el Edificio de Posgrado de Contaduría y Administración.**

Es importante conocer los factores para evaluar la implementación del sistema de intercambio geotérmico, con el fin de anticiparnos a las preguntas que pudieran surgir con la implementación de esta tecnología. Como ya se ha mencionado el sistema de intercambio geotérmico no es una tecnología nueva y se ha implementado en varios países siendo un sistema de climatización exitoso en comparación con el aire acondicionado convencional. Es por ello la inquietud de conocer si este sistema es posible implementarlo en México, principalmente en el Estado de Querétaro, ya que el sistema de intercambio geotérmico puede ser implementado tanto en edificios nuevos como en los ya existentes, sin embargo los costos, el consumo de energía, etc. varían dependiendo del edificio. El propósito del análisis es estimar y comparar los costos y beneficios del sistema de intercambio geotérmico contra el aire acondicionado convencional, identificando qué sistema se adapta mejor a las condiciones dadas, cuál es su funcionamiento, de cuánto es el beneficio generado por el ahorro de energía, la inversión para su implementación, así mismo se identifican los obstáculos o problemas de implementar este sistema.

Se han identificado los siguientes factores para realizar el análisis de factibilidad sobre la implementación del sistema de intercambio geotérmico en el Edificio de posgrado de la UAQ (de acuerdo a diversos ejemplos de análisis de factibilidad realizados):

1. Comparar el sistema de intercambio geotérmico con un sistema de climatización convencional, seleccionando una marca en específico (Chiasson, 2006). En este paso se definen las cargas de calefacción y refrigeración. A diferencia de los sistemas tradicionales de climatización que tengan en cuenta sólo la calefacción y el pico de las cargas de

enfriamiento; los métodos para estimar estas cargas son el uso de datos de otros edificios u hogares, las estimaciones de facturas de servicios públicos, el costo de las horas pico de energía, este tipo de análisis determina el esfuerzo necesario para calcular las cargas de calefacción y enfriamiento del hogar (NYSERDA, 2007).

2. El segundo factor es analizar las condiciones hidrogeológicas de la zona a estudiar. El sistema de intercambio geotérmico requiere de una profundidad de 10 y 150 metros dependiendo del tipo de sistema y la geología local. Factores tales como la profundidad de la roca, acuíferos y el gradiente de temperatura, juegan un papel muy importante en la profundidad requerida y del costo de la excavación (Halfhide, 2009).
3. El tercer factor es diseñar el sistema de intercambio geotérmico que mejor se adapte según las condiciones de la zona (número de vueltas y profundidad) (Chiasson, 2006). Los resultados de las simulaciones de energía se concentran en las cargas de calefacción y refrigeración, el consumo de energía y los costos de energía, estas ayudan a resaltar las diferencias entre los sistemas (sistema de intercambio geotérmico, calefacción, refrigeración, etc.). Existen varias herramientas de software disponibles para analizar el tamaño de la instalación para el sistema de intercambio geotérmico, estas herramientas han sido desarrolladas en diferentes universidades tales como la Universidad de Alabama en Estados Unidos o la Universidad de Lund en Suecia. Un estudio de Oak Ridge National Laboratory fue el de realizar una comparación de estas herramientas de software y el enfoque de cada una, de este estudio se resalta que el software 3GCHPCalc está basado en una plataforma DOS y es el más usado en Estados Unidos, además aceptado por la ASHRAE (NYSERDA, 2007).
4. El cuarto factor es obtener el costo anual de energía y los costos de operación.

5. El quinto factor es realizar un análisis económico, en donde se calcula el retorno de la inversión, los años de amortización, etc. (Halfhide, 2009). Este paso consiste en evaluar el costo de capital de la inversión, las estimaciones de los costos de instalación, etc.; la falta de instalaciones del sistema de intercambio geotérmico puede tener incertidumbre en el análisis, pero puede ser contrarrestada mediante la comparación de las estimaciones de otros proyectos. El punto más importante sobre las comparaciones de costos es mantener la coherencia en las fuentes de información entre las alternativas. El costo no sólo depende en las cargas del edificio sino también en la geología del lugar. El último paso es la toma de decisiones, un sistema de intercambio geotérmico a menudo requiere un esfuerzo adicional por parte del propietario y del ingeniero. El costo debe estar justificado por los beneficios de costo de operación y satisfacción de los ocupantes, se necesita tiempo para investigar y exponer los argumentos para elegir un sistema de intercambio geotérmico, ya que, la falta de experiencia del sistema a menudo añade un elemento de incertidumbre (NYSERDA, 2007).
6. Como sexto factor realizar un análisis de emisión de gases de efecto invernadero o también llamado un análisis de valoración de beneficios, los cuales son de carácter cualitativo.
7. Por último, el séptimo factor es considerar las barreras, como las legislaciones y limitaciones del sistema de intercambio geotérmico en el país a implementarse.

Una vez recopilada la información anterior, según la experiencia del investigador sobre el sistema de intercambio geotérmico, se podrá tomar una decisión sobre la implementación del sistema.

## 2.9 Modelo Triangular de Adopción de Tecnologías Verdes

Cuando se toma la decisión de adoptar una tecnología limpia, las empresas están influidas por las presiones y los flujos de información procedente de una amplia gama de actores sociales e institucionales.

La interacción de estas fuerzas externas con las capacidades y características de la empresa (incluido el tipo de estructura empresarial y la estrategia ambiental de la misma) y con las principales características tecno económicas de las tecnologías, dan lugar a la adopción (o no adopción) de una tecnología ambiental determinada, en la Figura 2.12 se muestra el modelo triangular para la adopción de tecnologías verdes (Del Rio, 2003).

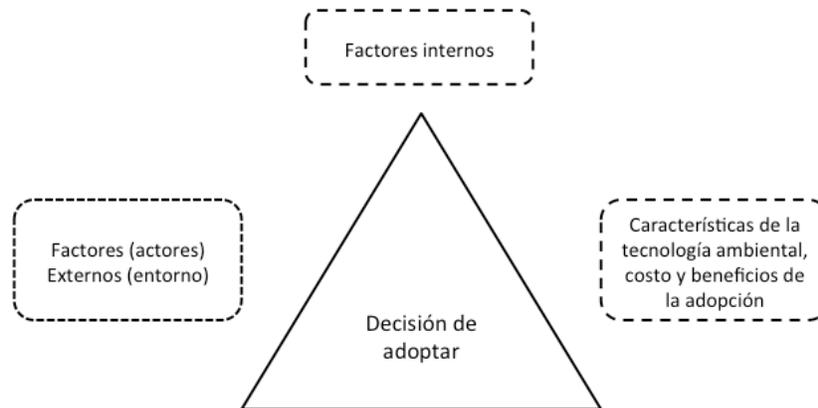


Figura 2.12: El modelo triangular de la adopción de tecnologías limpias. Fuente: La adopción y difusión de tecnologías limpias (Del Rio González Pablo, 2003).

En realidad cuando se adopta una perspectiva dinámica, estos tres conjuntos de factores (que componen lo que se ha denominado “Modelo Triangular”) coevolucionan fundamentalmente a nivel sectorial y a menudo conducen a una lenta transición tecnológica ambiental (Del Rio, 2003).

### 2.9.1 Factores internos de la empresa

Las empresas son organizaciones sociales que operan en un entorno complejo que genera presiones y oportunidades para el cambio. Al contrario de lo que se asume en los modelos neoclásicos de la empresa, los gestores tienen a menudo información imperfecta acerca de las tecnologías existentes y sobre el entorno socioeconómico (entorno de selección) en el que se encuentran. Por ello utilizan

frecuentemente rutinas conocidas para tomar decisiones en este entorno incierto. La adopción de tecnologías limpias requiere la existencia de algunas precondiciones interrelacionadas a nivel de la empresa (Del Rio, 2003).

- Una organización que incorpore los aspectos ambientales y que asuma una estrategia ambiental proactiva (Del Rio, 2003).
- Capacidad tecnológica. Uno de los obstáculos para la adopción de tecnologías limpias está relacionado con la falta de competencia tecnológica por parte de la empresa para asimilar el conocimiento técnico procedente de fuentes externas (capacidad de absorción), para elegir una tecnología limpia la empresa debe tener información sobre la existencia y disponibilidad de esas alternativas tecnológicas limpias y debe aprender a instalarlas y a utilizarlas adecuadamente. (Del Rio, 2003).
- Al mismo tiempo, debe ser capaz de predecir las tendencias más probables en la legislación ambiental y en el mercado para identificar que más le conviene, dados su estrategia y objetivos corporativos (Del Rio, 2003).

### **2.9.2 Factores externos a la empresa**

Las empresas operan, toman sus decisiones e interactúan con otros actores sociales, institucionales y de mercado en un determinado contexto socioeconómico (entorno de selección). Por lo tanto, el cambio tecnológico, y más específicamente, la adopción tecnológica puede considerarse como una respuesta de las empresas a los estímulos e incentivos procedentes de ese entorno de selección, como se muestra en la Figura 2.13.

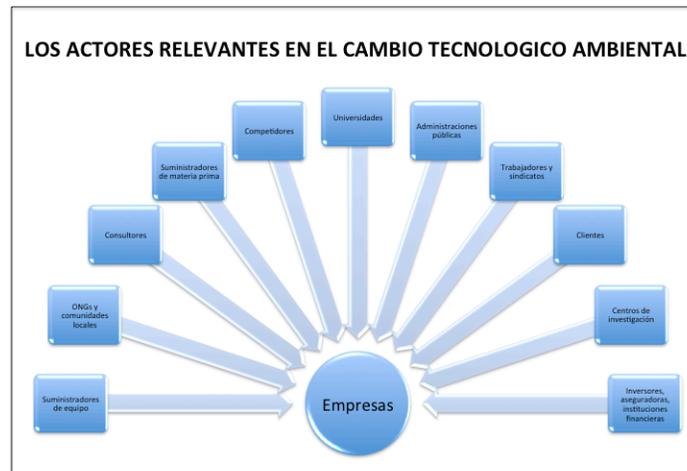


Figura 2.13: Los actores relevantes en el cambio tecnológico ambiental. Fuente: La adopción y difusión de tecnologías limpias (Del Rio González Pablo, 2003).

### 2.9.3 Características de las tecnologías y costos y beneficios de la adopción

Obviamente, la disponibilidad de alternativas tecnológicas constituye una precondition para la adopción. Se deduce que las características tecno económicas de las tecnologías limpias (incluidos los beneficios y costos de adopción) influyen en el grado de adopción y en la velocidad a la que esta tiene lugar.

La adopción de una tecnología limpia puede dar lugar a beneficios tangibles e intangibles para las empresas adoptantes.

- La explotación de una imagen verde por parte de la empresa puede provocar un aumento en los ingresos como consecuencia de un aumento en las ventas o de un aumento de precio (en el caso de que los consumidores estén dispuestos a pagar una prima por la adquisición de productos más limpios).
- Las tecnologías limpias podrían reducir los costos de producción. Esto puede ocurrir si las tecnologías incrementan la eficiencia del proceso de producción disminuyendo las necesidades de energía o materiales.
- Pueden obtenerse beneficios intangibles de la adopción (tales como una mejora en la calidad de los productos, en la imagen de la empresa y en la motivación del personal).

Sin embargo, a pesar de los posibles beneficios de la adopción, cuando estos se comparan con los costos surgen las principales barreras para la adopción:

- Incertidumbre y riesgo: una de las razones de la relativamente baja tasa de adopción de tecnologías limpias está relacionado con los riesgos e incertidumbres asociadas a la decisión de adoptar, estas incertidumbres pueden ser de diferentes tipos:
  - Relativas a la regulación.
  - Relacionadas con los cambios drásticos que la adopción puede provocar en las empresas.
  - Incertidumbres de mercado (por imposibilidad de recuperación de las inversiones realizadas) y técnicas (ignorancia sobre el funcionamiento de la tecnología o sobre sus costos de mantenimiento).

Los ciclos de inversión influyen en la probabilidad de adopción de tecnologías ambientales radicales. La adopción de una tecnología implica aplicar tecnologías complementarias, realizar profundos cambios en los procesos de producción existentes o en la organización de la empresa y formar al personal en el uso de la nueva tecnología, las tecnologías limpias son poco atractivas debido a la falta de difusión (Del Rio, 2003).

### 3. MARCO METODOLÓGICO

Esta investigación pretende analizar si el sistema de intercambio geotérmico es factible de implementar y puede llegar a ser una alternativa eficiente de climatización en los edificios queretanos ante el aire acondicionado convencional. Además, al realizar esta investigación se puede dar a conocer esta nueva tecnología en México ya que no se han registrado estudios sobre su implementación. En este estudio se pretende dar a conocer las partes que componen el sistema de intercambio geotérmico, su funcionamiento y cuáles serían sus costos de implementación y un análisis sobre la adopción de las tecnologías verdes, siendo esto la base para futuras investigaciones.

La realización de este estudio tiene una gran relevancia social ya que actualmente la preocupación de las personas por la preservación del medio ambiente ante el cambio climático está en su auge y se buscan nuevas tecnologías que minimicen el impacto ambiental negativo y que además proporcionen un uso práctico y eficiente, sin sacrificar la comodidad, de esta forma se propone el sistema de intercambio geotérmico como una alternativa efectiva de climatización ya que además de climatizar los edificios, proporciona un ahorro de energía, no emite grandes cantidades de contaminantes, ofrece el confort que las personas necesitan, etc.

Este estudio tendrá un enfoque mixto, es decir será tanto:

- Cualitativo, ya que considera a la realidad como un eje subjetivo y múltiple, este tipo de estudio es una alternativa para el estudio de sistemas complejos con muchos componentes interrelacionados, cuya explicación suele ser inestables (Groat y Wang, 2001). Desde este punto de vista se tomará en cuenta el factor de confort de las personas en edificios climatizados ya que se entiende como un estado mental en el que se involucra variables subjetivas y no solo como el resultado objetivo de un balance energético entre el cuerpo humano y su entorno (Covarrubias, 2012) y el beneficio generado al medio ambiente.

- Cuantitativos, que según Sampieri (2010) *“un enfoque cuantitativo, usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.”* (p. 4) por lo que se tomarán factores como análisis de inversión, ahorro de energía, análisis de sensibilidad, etc.

La dirección que tomará esta investigación será para responder las preguntas de investigación anteriormente planteadas:

- ¿Qué factores clave hacen factible la implementación de un Sistema de Intercambio Geotérmico en el Estado de Querétaro?
- ¿Cuál es el beneficio social y ecológico sobre la implementación del Sistema de Intercambio Geotérmico en el Estado de Querétaro?
- ¿Cuáles son las limitaciones para la adopción de esta tecnología verde?

Retomando el objetivo general de esta investigación “Analizar la factibilidad de implementar un sistema de climatización alternativo en el edificio de posgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro, en específico el sistema de intercambio geotérmico”.

El caso de estudio será el Edificio de Posgrado de Contabilidad de la Universidad Autónoma de Querétaro, este edificio ya existente cuenta con equipos de aire acondicionado convencional, por lo que se hará un análisis comparativo del gasto de energía actual, ahorro económico, etc. con el sistema de intercambio geotérmico. Este estudio comenzará con un análisis detallado del consumo de energía por hora, se describirá el edificio como:

- Área y tipo de suelo.
- Equipo de aire acondicionado utilizado actualmente.
- Iluminación.
- Material de construcción.

Y por último se analizará mediante el modelo de adopción de tecnologías verdes. A continuación el Diagrama 3.1, muestra los pasos para la realización del análisis de factibilidad aplicado al caso de estudio (Edificio de Posgrado).

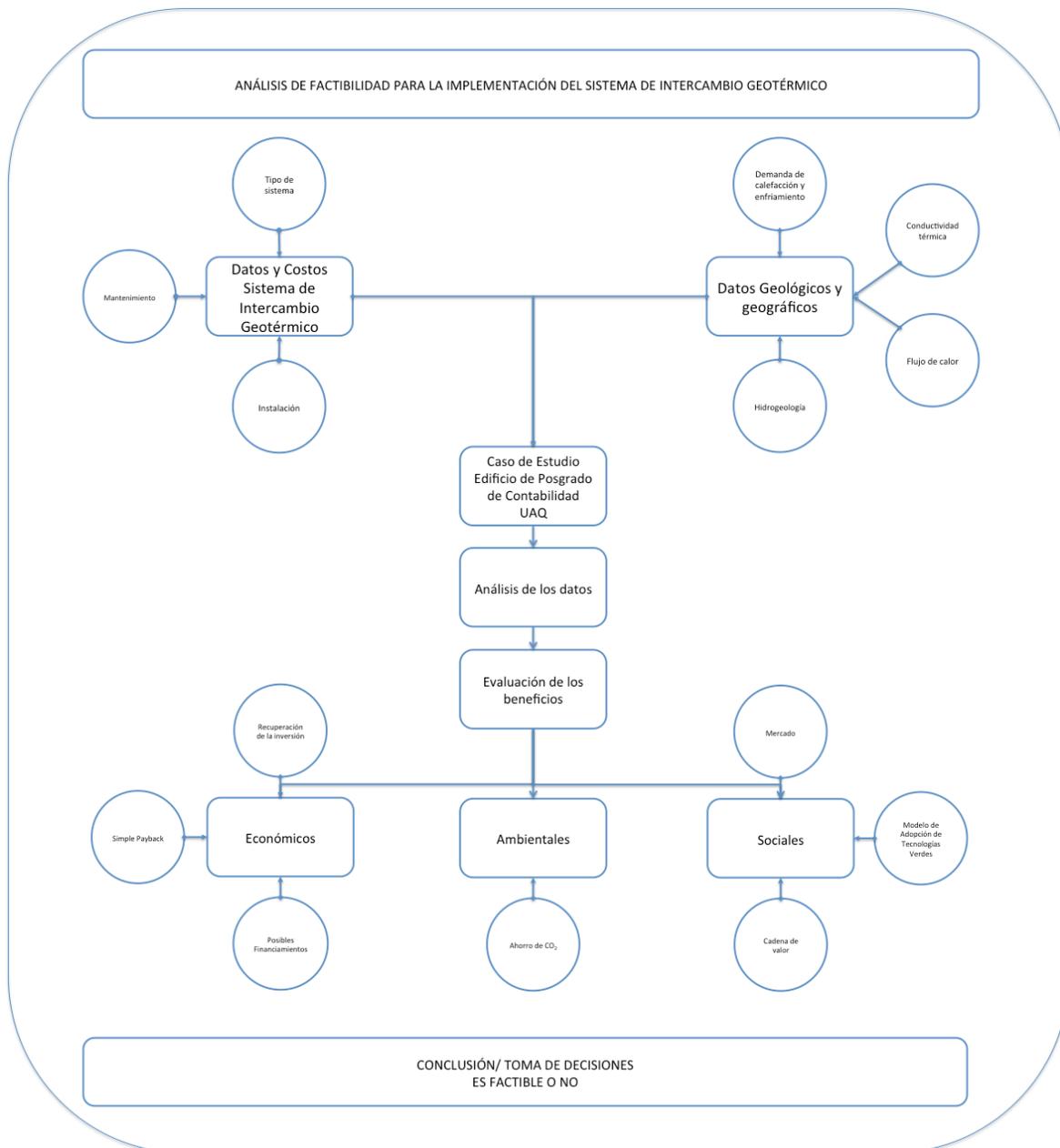


Figura 3.1: Diagrama para realizar un análisis de factibilidad del sistema de intercambio geotérmico. Fuente: Elaboración propia.

Así los factores a analizar serán:

**FACTOR 1: Elementos descriptivos del caso de estudio: Se obtendrán los elementos descriptivos del edificio para simular el consumo de energía.**

Este tipo de análisis determina el esfuerzo necesario para estimar la climatización del edificio. Los elementos que incluyen este análisis son:

- Área del suelo
- Denominaciones de espacio (número de habitaciones, ventanas).
- Ocupación y horario.
- Iluminación.
- Datos meteorológicos representativos.

**FACTOR 2: Mapas hidrogeológicos del edificio de posgrado de contabilidad: Obtener mapas hidrogeológicos donde se ubican las edificaciones.**

El rendimiento del sistema de intercambio geotérmico depende de las condiciones geológicas del lugar, por lo que es importante determinar el diseño del sistema con la mayor precisión posible con el fin de maximizar la eficiencia y minimizar los costos de instalación. Los factores que se deben tomar en cuenta en la obtención de los mapas hidrogeológicos de la zona son:

- La temperatura superficial.
- La temperatura subterránea.
- La conductividad térmica.
- Las capas de roca.

La resistencia de las rocas es un factor crítico para determinar el método de excavación o perforación requerida en el sitio y los costos asociados. La clave para determinar todos estos factores es un mapa de las condiciones del suelo del sitio (suelo, geología e hidrogeología). El uso apropiado de los factores geológicos ayudará a crear un sistema que cumpla con la calefacción y refrigeración requerida.

**FACTOR 3: Elección del sistema de intercambio geotérmico: De acuerdo con los requerimientos del edificio, escoger el sistema de intercambio geotérmico que mejor se adapte al nuevo edificio.**

**3.3.1. Elección de la bomba de calor**

Las especificaciones de la bomba de calor fijan varios parámetros de diseño del intercambiador de calor enterrado, ya que nos determinan el calor

intercambiado con el suelo y el caudal circulante por el intercambiador de calor, además de fijar el rendimiento del sistema (Coeficiente de desempeño: Coefficient of Performance COP) de acuerdo con sus curvas características de potencia-temperatura.

El COP de una bomba de calor representa la relación entre la capacidad térmica de la misma (Q) y la potencia eléctrica consumida para suministrarla (W). Su definición para los modos de calefacción y refrigeración es la siguiente, así como la relación entre el calor absorbido o inyectado al terreno.

$$COP \text{ calefacción} = \frac{Q \text{ calefacción}}{W \text{ calefacción}}$$

Q absorbido= Q calefacción – W calefacción

$$COP \text{ refrigeración} = \frac{Q \text{ refrigeración}}{W \text{ refrigeración}}$$

Q inyectado= Q refrigeración + W refrigeración

La selección de la bomba de calor se realiza a partir de un cálculo de cargas térmicas de acuerdo a las exigencias de diseño y dimensionado especificadas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas.

### 3.3.2. Elección de la configuración a emplear

Los tipos de configuraciones más usuales suelen atender a los siguientes criterios de clasificación:

- Según el tipo de instalación
  - Horizontal, según el número de tubos puede ser
    - Simple
    - Doble
    - Etc.
  - Vertical, según el tipo de tubería instalada
    - Simple U.
    - Doble U.
    - Coaxial.
    - “Slinky”
      - En zanja horizontal

- En zanja vertical
- Según la trayectoria del fluido
  - Serie
  - Paralelo

El diseñador seleccionará un modo de circulación u otro teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes que se citan a continuación.

Ventajas del sistema en serie:

- La trayectoria del fluido está perfectamente definida.
- El aire atrapado puede ser eliminado con gran facilidad (purga).
- Funcionamiento térmico más alto por metro lineal de tubo puesto que se requiere de un diámetro superior.

Desventajas del sistema en serie

- Se necesita un diámetro mayor para el tubo, lo que implica mayor cantidad de fluido y anticongelante (en su caso), es decir, aumenta el coste de la instalación.
- Longitud limitada debido a la caída de presión del fluido.

Ventajas del sistema en paralelo

- Coste de instalación más bajo al disminuir los diámetros necesarios y la cantidad de fluido de intercambio.

Desventajas del sistema en paralelo

- Hay que tener un cuidado especial para eliminar el aire que pueda quedar atrapado.
- Problemas para equilibrar el flujo en los distintos bucles.

**FACTOR 4: Definición de las cargas de calefacción y refrigeración del edificio de posgrado de contabilidad: Definir las cargas de calefacción y refrigeración, utilizando las tarifas actuales de energía de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), con el objetivo de determinar el esfuerzo necesario para estimar el consumo de energía para la calefacción y refrigeración del edificio.**

Es necesario definir las cargas de calefacción y refrigeración debido a que se debe diseñar el tamaño adecuado del sistema de intercambio geotérmico adecuado. Los métodos para estimar las cargas son: utilizar datos del edificio, facturas del consumo de luz de la Comisión Federal de Electricidad del edificio de posgrado de la Facultad de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro, con los detalles de la construcción y el equipo de aire acondicionado utilizado actualmente.

En este paso también se identifican los obstáculos para la implantación del sistema de intercambio geotérmico como espacio disponible, condiciones de perforación difícil, etc.

**FACTOR 5: Realizar un análisis sobre el costo de inversión, mantenimiento y compararlo con el aire acondicionado convencional.**

El Valor Presente (VP) de los costos del ciclo de vida del sistema de intercambio geotérmico y el sistema de amortización son los elegidos para la comparación de las alternativas del sistema de climatización.

- Los costos del ciclo de vida incluye el costo de capital (o costos iniciales).
- Gastos anuales (incluyendo los costos de operación y mantenimiento).
- Costos periódicos (como los costos de reposición).

El costo de capital y el ahorro de energía del sistema son utilizados para estimar el periodo de amortización.

**3.5.1 Capital, costos anuales y costos periódicos**

Los supuestos en las estimaciones de costos se muestran en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Detalles de la estimación de costos del sistema de intercambio geotérmico. Fuente: Elaboración propia.

	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Cantidad	Total	Comentarios
<b>COSTOS INICIALES</b>						
<i>Diseño ingeniería.</i>	e					
Reuniones	Horas					

Pre-diseño						
Rediseño	Porcentaje %					
Supervisión de la construcción.	Horas					
<b>Equipo e instalación</b>						
Costo de instalación	m <sup>2</sup>					
Perforación	m					
Equipo						
<b>COSTOS ANUALES</b>						
Ahorro de energía						
Ahorro incremental de mantenimiento	m <sup>2</sup>					
<b>COSTOS PERIODICOS</b>	Años					
Reemplazo condensador						
Bomba						

Como existe cierta incertidumbre en la predicción de los costos, se recomienda realizar un análisis de sensibilidad para cuantificar el efecto de las partidas de los gastos diversos en la recuperación simple (simple payback).

### 3.5.2 Comparación de alternativas

En este factor se van a tomar en cuenta la comparación del Valor Presente y la recuperación simple (Simple Payback), realizando los siguientes supuestos:

- Tasa de incremento del costo anual de la energía, representado en porcentaje (%)
- Tasa de incremento del costo anual de mantenimiento, representado en porcentaje (%).
- Tasa de descuento, representado en porcentaje (%)
- Tiempo de vida del proyecto, representado en años.

La viabilidad de un sistema de intercambio geotérmico es mejor comprendido con un enfoque de recuperación simple, dada la volatilidad de los materiales y de la energía. Los datos se ponen en la Tabla 3.2

Tabla 3.2: Comparación económica de los sistemas de climatización. Fuente: Elaboración propia.

Sistema de climatización.	Costo total de capital	Costos anuales		Costos periódicos	Recuperación simple (años)	Valor Presente Neto
		Energía	Mantenimiento			

						de costo años del ciclo vida del proyecto
Sistema de climatización convencional						
Sistema de intercambio geotérmico.						

### 3.5.3 Mantenimiento

Las instalaciones de bomba de calor geotérmica precisan de menor mantenimiento que las instalaciones convencionales, ya que la parte enterrada no necesita ningún tipo de mantenimiento y la bomba de calor agua-agua necesita de menor mantenimiento que una bomba de calor aire-agua.

**FACTOR 6: Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros que podrían tener un impacto significativo en el consumo de energía, como son temporalidad (verano, invierno), ventilación, iluminación, ocupación, etc. Estos parámetros junto con el tamaño del edificio y detalles de construcción son básicos para realizar un análisis de factibilidad.**

Con el fin de cuantificar la incertidumbre en las estimaciones de costos del sistema de intercambio geotérmico. El análisis de sensibilidad se realizará sobre el periodo de recuperación de la inversión. Este análisis revela el costo más sensible del sistema de intercambio geotérmico, por lo que es necesario realizar una simulación de los incrementos de la cantidad de energía utilizada ya que de ello puede depender un incremento en el costo de capital, alterando el periodo de recuperación de la inversión.

**FACTOR 7: Realizar una simulación, con el software disponible, para sustentar la información recabada del edificio de posgrado.**

Las demandas anuales de calefacción y refrigeración del edificio de Posgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro se determina a partir del software de simulación RetScreen donde se realizaran supuestos de los costos de energía anual del sistema de intercambio geotérmico y el sistema de climatización convencional, con el fin de realizar los análisis posteriores.

**FACTOR 8: Realizar un análisis cualitativo sobre el beneficio ambiental, ecológico y social sobre la implementación este sistema alternativo de climatización.**

Las emisiones de gases de efecto invernadero se han atribuido a diversos impactos negativos sobre la calidad del aire. Como resultado de ello, las emisiones de carbono se han regulado en algunos lugares del mundo. Los edificios con climatización artificial (como el aire acondicionado convencional) son responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el uso de la electricidad generada por las centrales eléctricas.

Para realizar este análisis sobre el beneficio ambiental generado, se utilizara un software como RetScreen, el cual permite calcular la reducción de emisiones de gases del sistema de intercambio geotérmico para el edificio de Posgrado de la Universidad. Para analizar el beneficio o limitaciones sociales que pudiera tener la implementación de este sistema, se realizará mediante el modelo de adopción de tecnologías verdes ya que es importante analizar debido a la comercialización de nuevas tecnologías.

La herramienta RetScreen es utilizada por más de 250,000 usuarios en 222 países, disponible en más de 35 idiomas que representan más de 2/3 de la población mundial. **El proceso de desarrollo de RetScreen es un ejemplo de exitosa cooperación internacional, fundamentada en la responsabilidad social de Países y Empresas.** Con el apoyo de una red internacional de expertos de la industria, el gobierno y la academia. Los socios principales incluyen la Aeronáutica Nacional y Administración del Espacio: National Aeronautics and Space Administration (NASA), la Asociación de Energía Renovable y Eficiencia Energética: Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership (REEEP), El Programa Ambiental de las Naciones Unidas: United Nations Environment Programme (UNEP) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial: Global Environment Facility (GEF).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

##### 1. Elementos descriptivos del edificio



Figura 4.1: Edificio de posgrado de contaduría y administración de la Universidad Autónoma de Querétaro.

El edificio de Posgrado de Contaduría y Administración cuenta con 16 salones de clase, una biblioteca, un centro de cómputo, un laboratorio de gestión de tecnologías, con área de oficinas y cubículos para maestros. El edificio cuenta con aproximadamente 3,933 m<sup>2</sup> de construcción (42,334 ft<sup>2</sup>). A continuación, en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran los planos del edificio de posgrado.

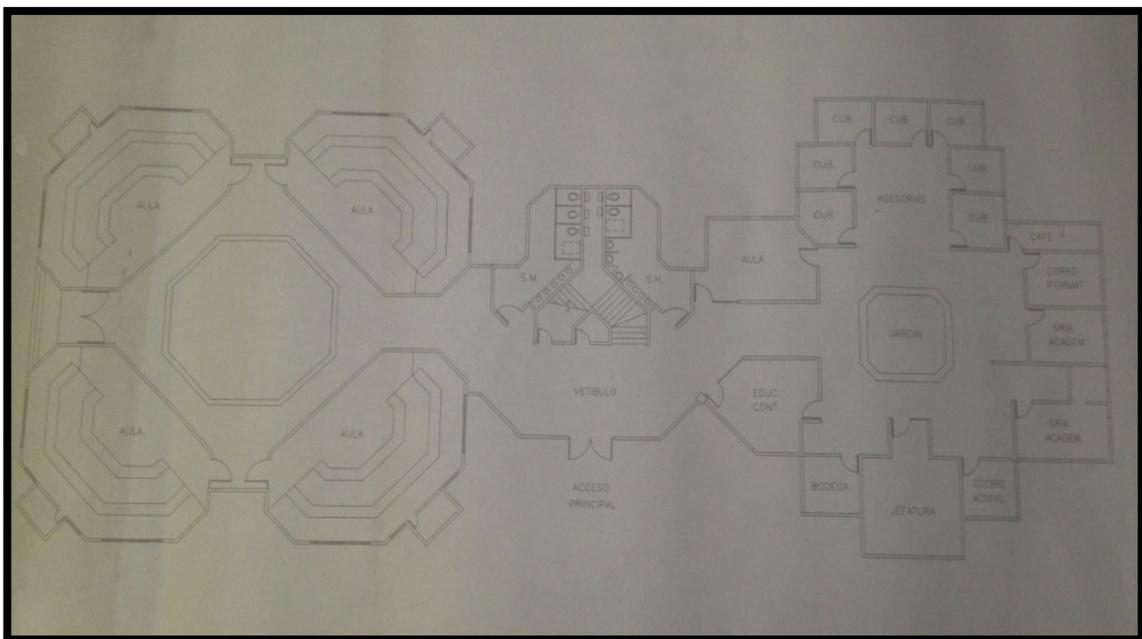


Figura 4.2: Planta baja del edificio de posgrado de Contaduría y Administración.

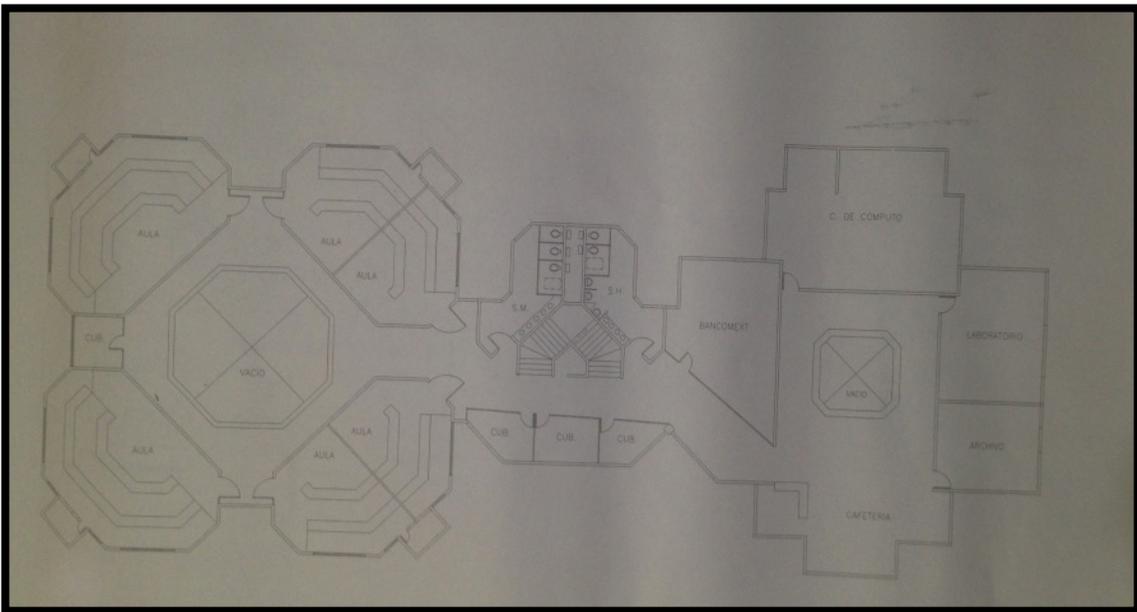


Figura 4.3: Segundo piso del edificio de posgrado de Contaduría y Administración.

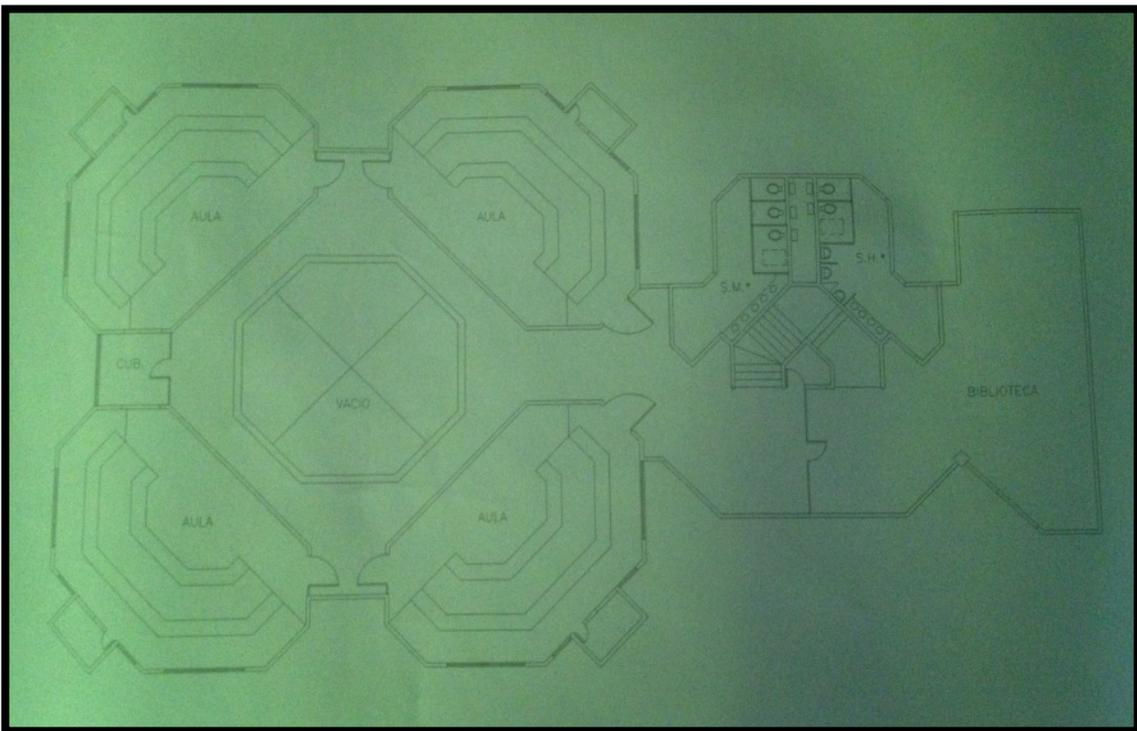


Figura 4.4: Tercer piso del edificio de posgrado de Contaduría y Administración.

A continuación (Figura 4.5) se muestra la distribución de las aulas de clase.



Figura 4.5: Distribución del aula de clase.

Tiene una construcción tipo tradicional de tabique con aplanado de mezcla fina, las puertas de los salones y de las oficinas son de madera tipo tambor. Cuenta con un plafón modular tipo austromex de yeso texturizado.

En el edificio (Figura 4.6) el vidrio es del tipo comercial de 6 mm de espesor. Cuenta con dos domos de lámina de policarbonato.

El edificio se ocupa actualmente para las clases de Maestría, Doctorado y algunas clases de licenciatura, por lo que tiene una capacidad para 300 personas aproximadamente en un horario de 19:00 a 22:00 horas.

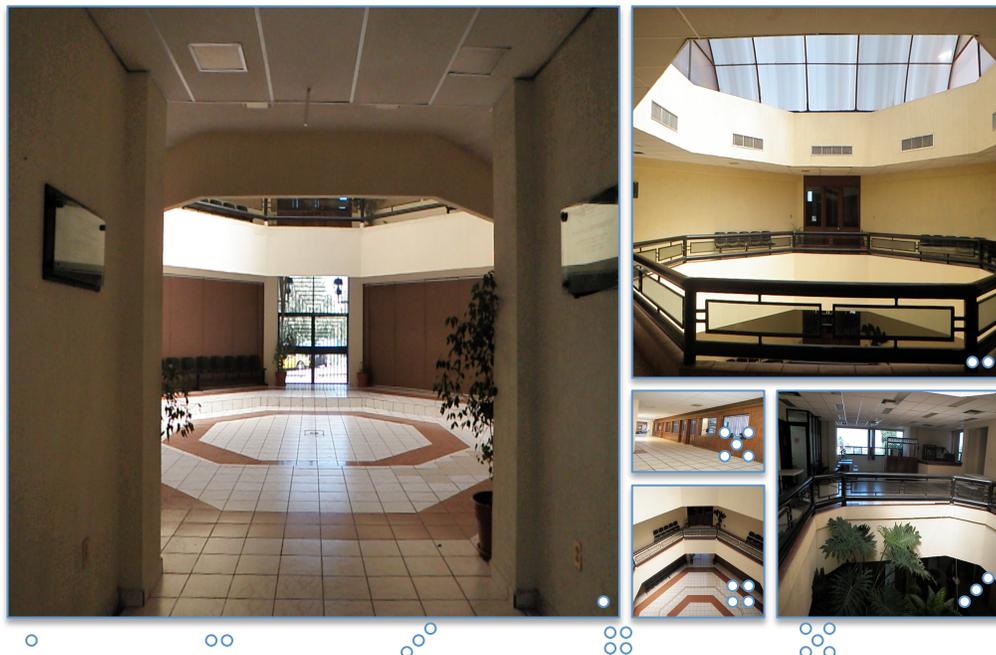


Figura 4.6: Edificio de Posgrado de Contaduría y Administración

## 2. Mapas hidrogeológicos del edificio de Posgrado de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro.

La ciudad de Querétaro, cuyo núcleo principal lleva por nombre Santiago de Querétaro, y es la capital del Estado de Querétaro Arteaga, se localiza en la parte occidental de la entidad, aproximadamente entre los  $100^{\circ} 20'$  y los  $100^{\circ} 30'$  de longitud Oeste; y entre  $20^{\circ} 30'$  y  $20^{\circ} 45'$  de latitud Norte, como se muestra en la Figura 4.7

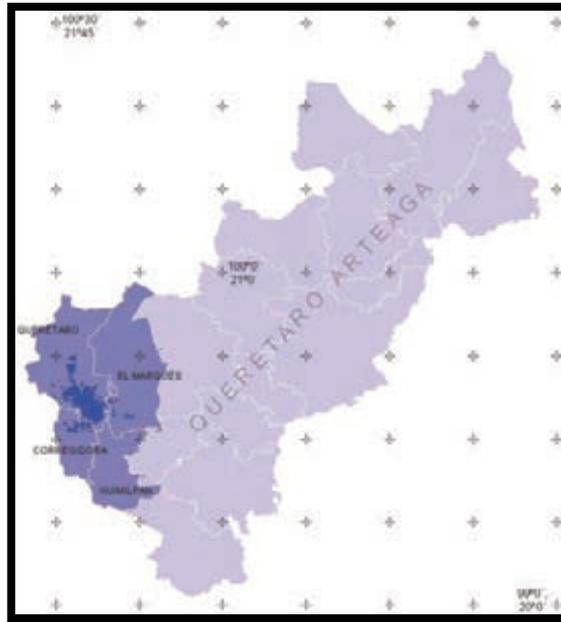


Figura 4.7: Localización de la Zona Conurbada de Querétaro y los 4 municipios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Querétaro en el estado, con coordenadas extremas.

En el valle de Querétaro se encuentra toda la gama de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas) por lo que en el campo se pueden observar una gran cantidad diversidad de suelos.

En el mapa geológico se distinguen un total de nueve unidades geológicas que son:

- Depósitos del tipo lacustre (Qla).
- Depósitos fluviales (Qfl).
- Basalto unidad cimatarío (TQbc)
- Ignimbritas riolíticas Unidad Hércules (Tsth)

- Tobas de caída libre Unidad Cuesta China (Tstcc)
- Andesita y basalto de la Unidad Menchaca (Tmbm)
- Tobas arcillosas, arenosas y vítreas de la Unidad Mompaní (Titm)
- Basalto y andesita Unidad San Pedrito (Tibsp) e intrusivos de la Unidad Juriquilla (Tij).

También en el mapa (Figura 4.8) se muestran las cinco fallas tectónicas que limitan la “Fosa Querétaro”, ellas son: Oriente (Tángano-San Pedrito El Alto), Centro (Campestre- Santa Rosa de Jáuregui), Poniente (Balvanera- Mompaní), Norte (Mompaní-San Pedrito El Alto) y Sur (Balvanera-Tángano).

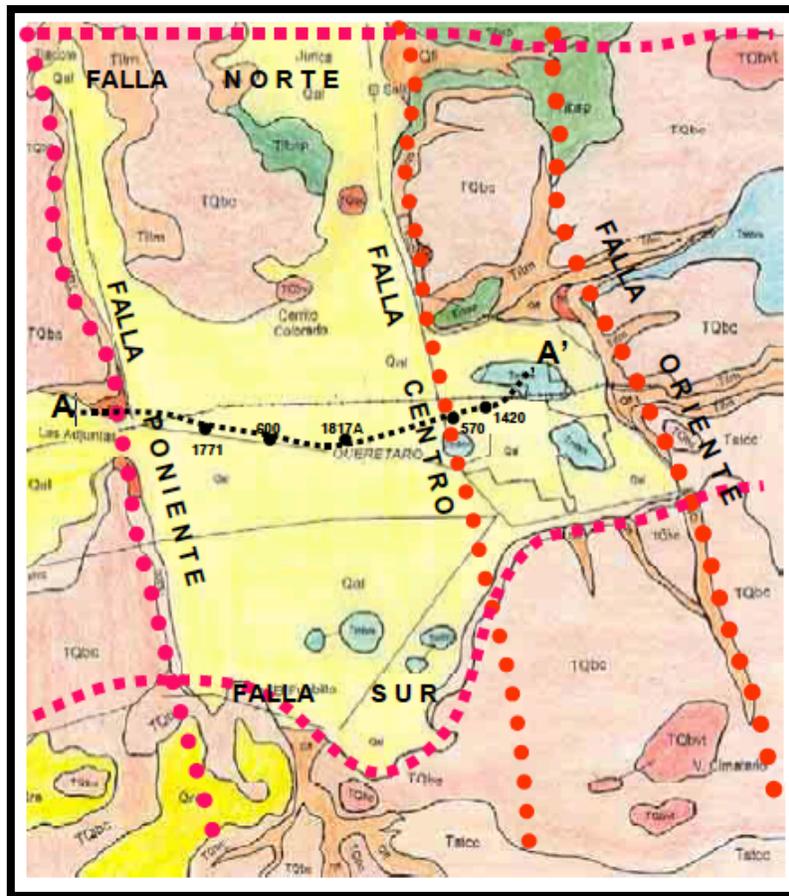


Figura 4.8: Mapa geológico, después de Salas C., J. L., Álvarez Manila A., Fernández H. F., García B. J. y Yáñez C., 1986.

El edificio de Posgrado de la Facultad de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro, se encuentra ubicado en el Valle de

Querétaro, en el Cerro de las Campanas. En la Figura 4.9 se muestra la ubicación del edificio.

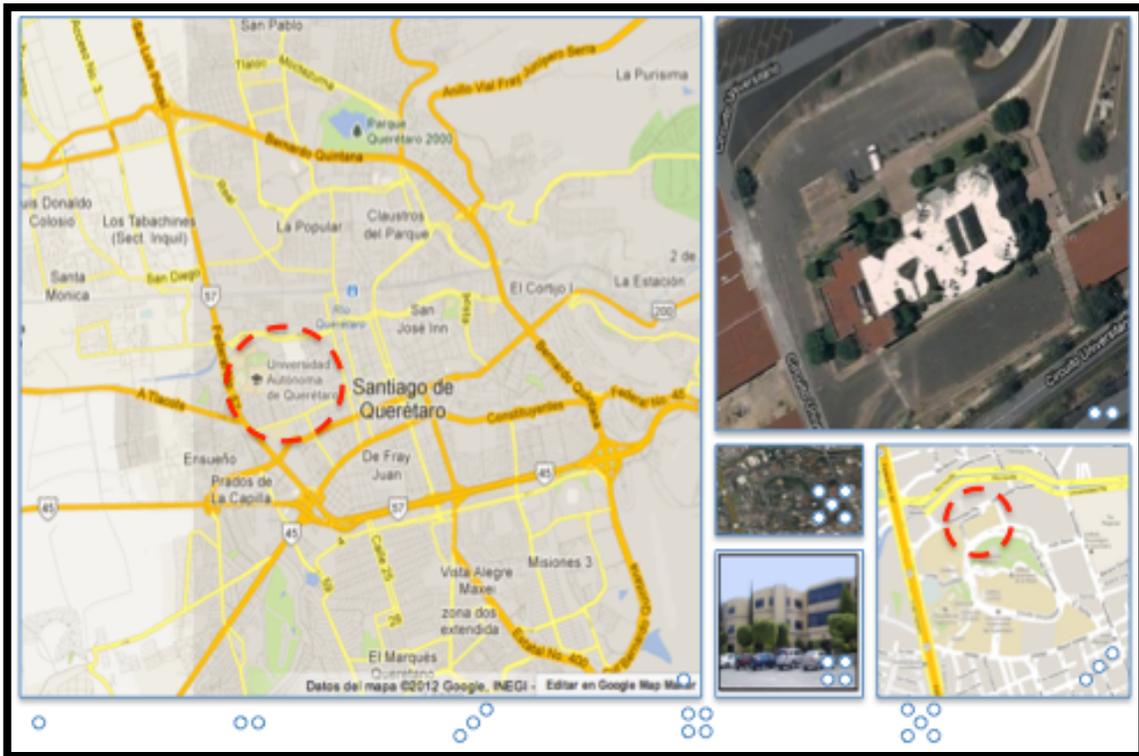


Figura 4.9: Edificio de Posgrado de la Facultad de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro.

La sección estructural mostrada en la Figura 4.10 se muestran los tipos de materiales, en la porción central donde se ubica el Cerro de Las Campanas, donde se ubica el edificio de Posgrado se aprecia el cuerpo de una roca de intrusión, las laderas pueden estar formadas de manera indistinta por tobas o lavas.

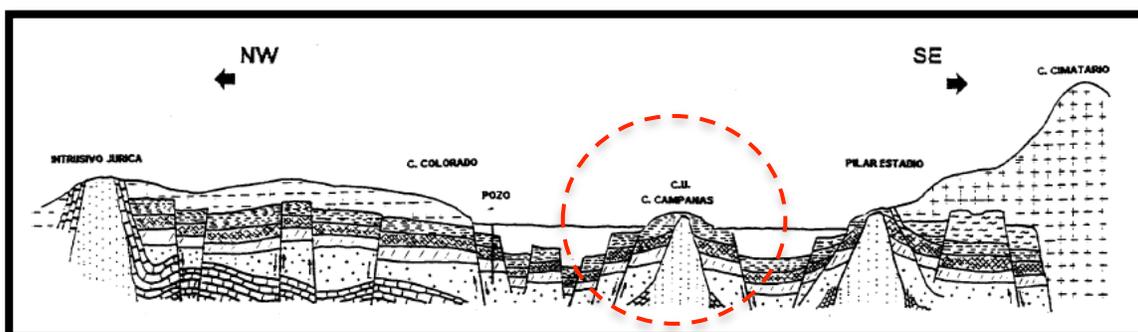


Figura 4.10: Sección estructural del Cerro de Las Campanas, donde se ubica el edificio de Posgrado.

A continuación se muestran las diferentes capas de suelo (Figura 4.11) encontrados en el edificio de posgrado. Como se puede observar el suelo está compuesto por arcilla negra y por tobas.



Figura 4.11: Capas de suelo del edificio de posgrado.

### 3. Elección del sistema de intercambio geotérmico.

Sistema de aire acondicionado convencional y rediseño

El sistema de climatización convencional consiste de una mezcla de equipos de Split modelo 38CKC048-M-561 serie No. 3703E03617 y modelo 38CKC024-M-3 serie No. 2004E08275. Los sistemas se encuentran diseñados para cada salón, este sistema de Split tiene una unidad interna y otra externa, las cuales se encuentran interconectadas por tubos con refrigerante, como se muestra en la Figura 4.12.

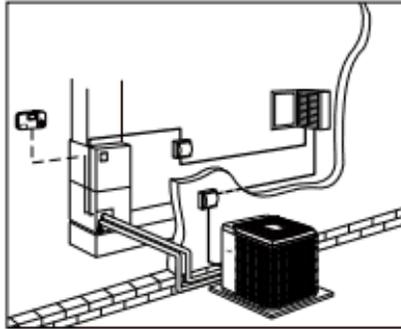


Figura 4.12: Instalación típica del sistema Split. Fuente: Carrier 38CKC air conditioner.

El sistema de enfriamiento utiliza gas refrigerante R-22, el cual ha sido prohibido en algunos países por ser altamente perjudicial para la capa de ozono, por lo que se ha sustituido por el gas refrigerante R407C o R410A. La unidad consiste de un compresor hermético, una bobina, ventilador del condensador de tipo hélice, refrigerado por aire y una caja de control. En la Figura 4.13 se muestra los tipos de aires acondicionados instalados actualmente en el edificio.

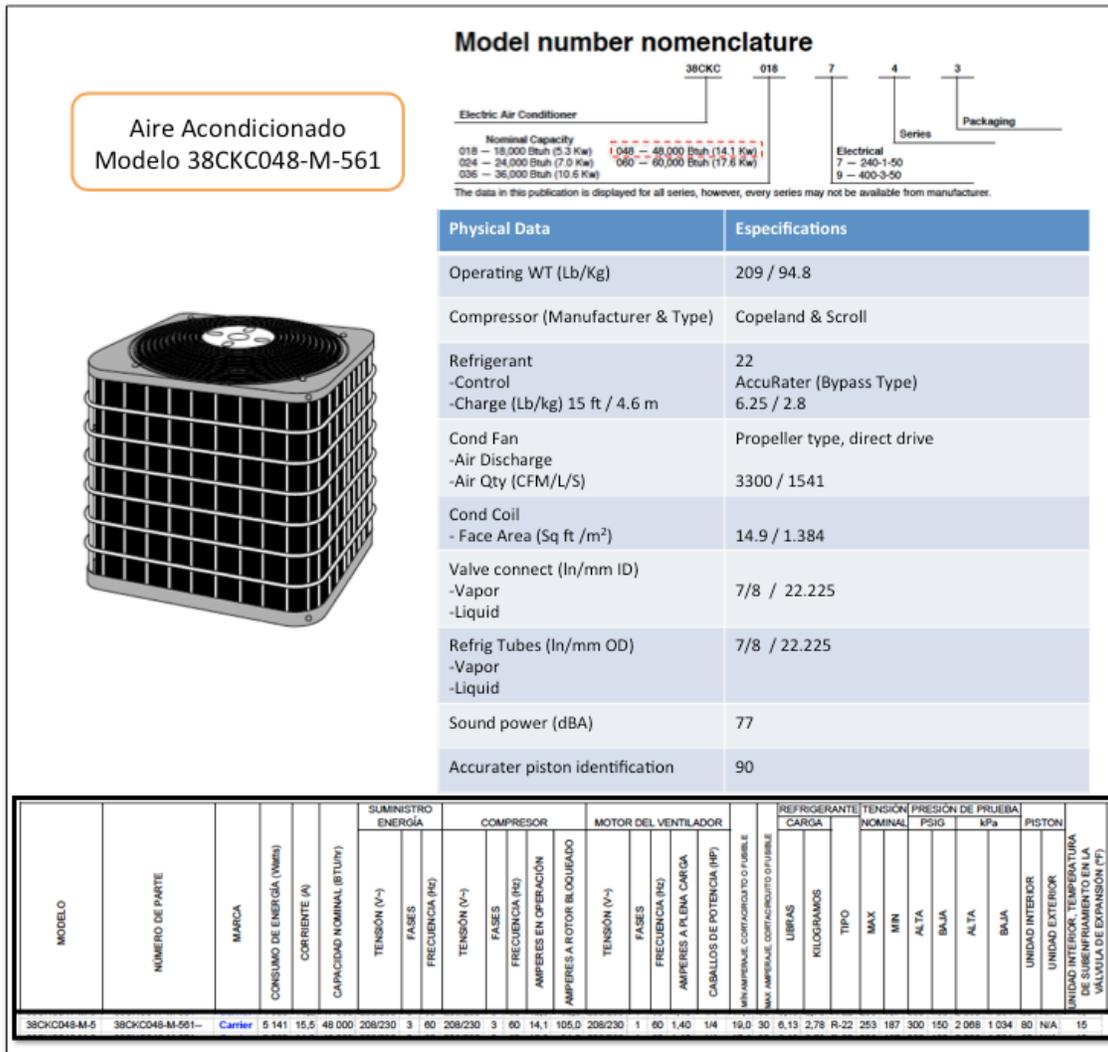


Figura 4.13: Aire acondicionado modelo 38CKC048-M-561. Fuente: Elaboración propia.

Este equipo de aire acondicionado del modelo 38CKC048-M-561 tiene una capacidad de 4 toneladas y de 48,000 BTU/Hr, un costo aproximado de \$2,639 USD incluyendo equipo e instalación, como se muestra en la Tabla 4.1 la cotización de este modelo.

Tabla 4.1 Cotización del modelo 38CKC048-M-561

ARTICULOS				VALOR	
ITEM	CANTIDAD	UNIDAD MEDIDAD	DESCRIPCION	UNITARIO	TOTAL
1	1	UNIDAD	<p>EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO DE LAS SIGUIENTES CARACTERISTICAS:</p> <p>01 EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO, TIPO SPLIT DECORATIVO PISO TECHO, MARCA: CARRIER, MODELO: <b>38CKC048-M-561</b>, CAPACIDAD 48,000 BTU/HR DEBE INCLUIR:</p> <p>CONTROL REMOTO INALAMBRIICO, TEMPORIZADOR PROGRAMABLE EN ENCENDIDO Y APAGADO, AUTO APAGADO.</p> <p>MODO AUTOMATICO PARA DORMIR.</p> <p>DESHUMIDIFICACION SALUDABLE.</p> <p>OPERACIÓN AUTOMATICA.</p> <p>CONTROL DIRECCION AIRE HORIZONTAL, TERMOSTATO AUTOMATICO, OPERACIÓN SILENCIOSA.</p> <p>FILTROS PURIFICADORES DE AIRE, DE FACIL LIMPIEZA.</p> <p>SISTEMA 3 VELOCIDADES</p> <p>CERO CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA EN STAND BY</p> <p>PROTECTOR DE VOLTAJE, FASE Y CICLOS CORTOS ICM</p> <p>CARACTERISTICAS ELECTRICAS: 220V/3f/60 HZ.</p> <p>01 GLB. MONTAJE E INSTALACION ELECTROMECHANICA:</p> <p>ACARREO, IZAJE Y MONTAJE DE LA UNIDADES DE AIRE ACONDICIONADO.</p> <p>SUMINISTRO E INSTALACION DE BASES DE ANCLAJE DE UNIDAD EVAPORADORA Y CONDENSADORA, FABRICADA DE ANGULO DE FIERRO DE 1 ¼" X 1/8", PINTADO CON ZINCROMATO Y ACABADO CON PINTURA NEGRA ESMALTE.</p> <p>ANCLAJES DE LA UNIDAD CONDENSADORA EN PARED EXTERIOR ADOSADO Y EVAPORADORA EN TECHO CON PERNOS DE FIJACION DE 3/8", TACOS DEL TIPO HILTI, TUERCAS Y ARANDELAS.</p> <p>SUMINISTRO E INSTALACION DE TUBERIAS DE COBRE DEL TIPO L DE 7/8" Y 3/8" PARA LAS LINEAS DE SUCCION Y DESCARGA, DE INTERCONEXION ENTRE EVAPORADOR Y CONDENSADOR (DISTANCIA APROXIMADA 13 MTS. LINEALES), SUMINISTRO DE FILTRO SECADOR.</p> <p>SUMINISTRO E INSTALACION DE AISLAMIENTO TERMICO PARA LAS TUBERIAS DE COBRE DEL TIPO ARMARLEY DE 1/2" DE ESPESOR.</p> <p>LIMPIEZA DEL SISTEMA DE REFRIGERACION, PRUEBA DE ESTANQUEIDAD CON N2, PARA VERIFICAR FUGAS A 200 PSI, VACIO, PRECARGA Y CARGA DE GAS REFRIGERANTE R22.</p> <p>SUMINISTRO E INSTALACION DE SISTEMA DE DRENAJE CON TUBERIAS DE PVC DE ½", DEBE INCLUIR TRAMPA DE MALOS OLORES, RESPIRDERO Y ACCESORIOS, RECORRIDO 15.0 METROS, SE REQUIERE BOMBA DE CONDENSADO.</p> <p>SUMINISTRO E INSTALACION DE SISTEMA DE ELECTRICO DE FUERZA CON CABLE Nº 10,14,16 THW 7 HILOS, DEBE INCLUIR CONEXIÓN ENTRE EVAPORADOR Y CONDENSADOR DE FUERZA Y CONTROL, SE DEBE CONSIDERAR PUNTO DE ENERGIA A NO MAS DE 6 METROS.</p> <p>DEBE INCLUIR TRABAJOS DE OBRA CIVIL, PICADOS, RESANES Y PINTADO.</p> <p>PRUEBAS FINALES Y PUESTA EN MARCHA.</p> <p>DEBE INCLUIR TRABAJOS A TODO COSTO COMO TRASLADO DE EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS, ADEMAS GASTOS DE HOSPEDAJE, MOVILIDAD, VIATICOS Y OTROS.</p>	2,639.00	2,639.00
<b>TOTAL EN DOLARES AMERICANOS</b>					<b>2,639.00</b>

El segundo tipo de aire acondicionado utilizado en el Edificio de Posgrado es el Modelo 38CKC024-M-3, este aire acondicionado tiene una capacidad de 2 toneladas y de 24,000 BTU/Hr. Tiene un precio aproximado de \$1,751 USD, en la Figura 4.14 se muestran las especificaciones de este equipo.

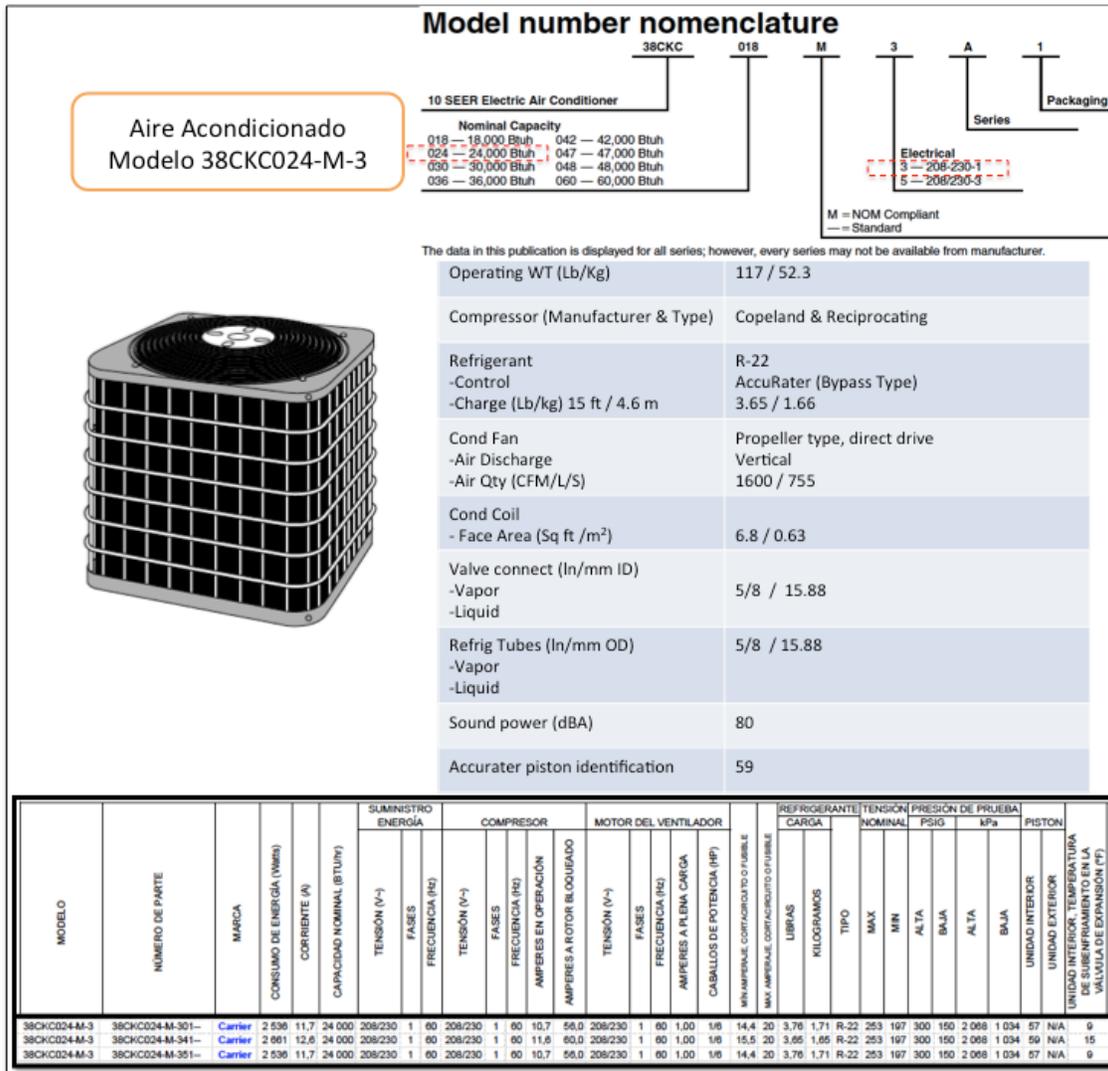


Figura 4.14: Aire acondicionado modelo 38CKC024-M-3. Fuente: Elaboración propia.

Todo el equipo es de la marca Carrier, con una eficiencia de refrigeración de 80% y un SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratios) de 10 (Product Data Carrier, 2013).

Cada sistema instalado solo responde a las necesidades de cada salón de clases lo que permite un excelente control y un funcionamiento eficiente, sin embargo la falta de mantenimiento preventivo y el tiempo ha hecho que algunos aires acondicionados no funcionen y tengan que usar ventiladores portátiles.

El sistema de climatización convencional que tiene el edificio de posgrado puede funcionar para instalar el sistema de intercambio geotérmico (bomba de

calor), esto debido a los canales de distribución del aire en cada aula, lo que hace que los dos sistemas sean similares en costo (de mano de obra y materiales), sin embargo los sistemas de aire acondicionado se encuentran divididos por lo que será necesario comunicar mediante tuberías, lo que conlleva costos adicionales en el interior del edificio además de requerir una pequeña sala de máquinas para alojar la bomba de calor y el equipo adicional para que las condiciones climáticas no afecten su capacidad.

Según las condiciones geológicas antes mencionadas el sistema de intercambio más óptimo es el tipo horizontal, ya que este tipo de sistema consiste en una red muy compacta de bobinas enterradas, este tipo de instalación requiere de una mayor cantidad de tubo debido a la forma de bucles, esta instalación deberá estar instalada no menor a 2.5 metros (8 ft) de profundidad debido a las fluctuaciones estacionales de temperatura. El tamaño estimado de una instalación horizontal tomaría aproximadamente el 90% del área de estacionamiento posterior, alrededor de 2,000 m<sup>2</sup> (14,000 ft<sup>2</sup>), el sistema horizontal se muestra en la Figura 4.15.

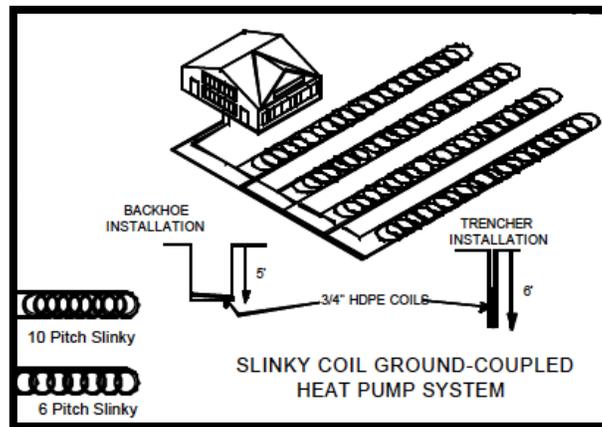


Figura 4.15: Sistema de intercambio geotérmico horizontal. Fuente: Chiasson.

El costo aproximado según Geo-Heat Center de la instalación dentro del edificio es de \$11 USD/ ft<sup>2</sup> y el costo de instalación (fuera del edificio) es de \$1,250 USD/ ton de enfriamiento, como se muestra en la Figura 4.16.

HVAC System	Typical Installed Cost (Inside the Building) (\$/sq. ft of floor space)	Typical Installed Cost (Geothermal Earth Work) (\$/ton of cooling)
Conventional	\$13.50	-
Open-Loop Geothermal	\$11.00	\$750
Vertical Closed-Loop Geothermal	\$11.00	\$1,750
Horizontal Closed-Loop Geothermal	\$11.00	\$1,250

Figura 4.16: Costos del sistema de intercambio geotérmico. Fuente: Chiasson

#### 4. Definición de las cargas de calefacción y refrigeración.

Mediante un programa de computadora llamado RetScreen fue posible calcular las cargas de calefacción y de refrigeración para estimar el consumo anual de energía del sistema de aire acondicionado convencional. El equipo de aire acondicionado de la marca Carrier modelos C38CKC048-M-561 y C38CKC024-M-3 cuenta con una capacidad de enfriamiento total de 2.9 millones de BTU/ hr y una capacidad de calentamiento total de 1.6 millones de BTU/ hr (136 ton). Gran parte de la carga de exceso de enfriamiento se debe a las cargas de aire exterior. Este programa utiliza datos meteorológicos del Estado de Querétaro, utiliza los horarios de ocupación del edificio, la iluminación y el equipo de aire acondicionado utilizado en el edificio. Se asumió una ocupación del 50% durante el periodo vacacional.

La carga máxima de enfriamiento para la construcción del sistema de intercambio geotérmico según el software RetScreen es de 1.375 millones BTU/hr. (115 ton) y la carga térmica máxima de 2.9 millones BTU/hr. Estos valores están en excelente acuerdo con la capacidad del sistema de intercambio geotérmico propuesto. Por lo que la carga anual de refrigeración se estima en 1040 millones BTU/ año y la carga de calefacción en 483 millones BTU/año.

#### 5. Análisis sobre el costo de inversión, mantenimiento y compararlo con el aire acondicionado convencional.

Las demandas anuales de calefacción y refrigeración del Edificio de Posgrado de Contabilidad de la Universidad Autónoma de Querétaro se determinaron a partir del software RetScreen Estos supuestos se utilizaron para la estimación del costo anual de energía del sistema de aire acondicionado convencional y el sistema de intercambio geotérmico.

Como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Consumo anual de energía y costo de la energía para los sistemas de climatización. Elaboración propia.

Consumo Anual de energía y Costo de energía para los sistemas de climatización					
	Enfriamiento		Calefacción		Total
<b>Cargas (loads)</b>					
Carga máxima (Peak load)	2,958,328	BTU/Hr	114.58	Ton	
	867	kW	403	kW	
Carga anual (Annual load)	1,041,000,000	BTU	483,283,000	BTU	
	305,100	kWh	141,642	kWh	
<b>Sistemas de climatización</b>					
<b>Sistema de intercambio geotérmico</b>					
Coeficiente de desempeño (COP)	4		4.7		
Costo de Energía Eléctrica	\$0.06 USD	kWh	\$0.06 USD	kWh	
Enfriamiento suplementario requerido	464	kWh			
<b>Sistema de aire convencional</b>					
Eficiencia	0.8		3.0		
Costo de Energía	\$0.06 USD	kWh	\$0.06 USD	kWh	
Costos anuales de energía					
% carga para suplementos (% peak met by supplemental)	54%				
% carga anual para suplementos (% annual met by supplemental)	6%				
Bombas de calor (Well pumps)	\$329	USD	\$153	USD	
Fuente tierra (Ground source)	\$6,122	USD	\$1964	USD	\$8,086 USD
Conventional	\$23,133	USD	\$2,833	USD	\$25,966 USD
Ahorros anuales	\$17,011	USD	\$869	USD	\$17,880 USD

En la primera sección de la tabla muestra los datos de las cargas, la segunda sección muestra la eficiencia del sistema convencional según las especificaciones del Equipo Carrier. Los COP (Coeficiente de rendimiento por sus siglas en inglés) de las bombas de calor utilizadas en el sistema de intercambio geotérmico son los típicos de un sistema horizontal. Las tarifas eléctricas se estimaron en \$0.06 USD kW/h, según la CFE la tarifa 5 de tensión baja el costo energía eléctrica es de \$2.97 MXN/ kWh. Este costo se supuso ya que actualmente el edificio no maneja un recibo de luz individual.

La tercera sección de la tabla muestra los costos anuales de energía para cada sistema de climatización.

El costo anual de energía de los sistemas de climatización se estimaron en:

Sistema Convencional (Split carrier)----- \$25,966 usd.

Sistema de intercambio geotérmico (Horizontal)----- \$ 8,086 usd.

Por lo tanto el sistema de intercambio geotérmico puede ser operado con un ahorro de energía anual de \$17,880 usd o alrededor de 1/3 del costo del sistema convencional. Esta reducción de costos se debe principalmente a la alta eficiencia de la bomba de calor.

## **5.1 Análisis económico**

El valor presente (VP) con un ciclo de vida de 50 años y un enfoque de recuperación simple (simple payback) fueron elegidos para la comparación de las dos alternativas del sistema de climatización. Los costos del ciclo de vida se consideraron los costos de capital (costos iniciales), los costos anuales (incluyendo costos de operación y mantenimiento) y costos periódicos (costos de reposición). El costo de capital y el ahorro de energía del sistema de intercambio geotérmico se utilizaron para estimar un periodo de recuperación simple (simple payback). Como existe cierta incertidumbre en la predicción de estos costos, se realizó un análisis de sensibilidad para cuantificar el efecto de diversos elementos de costo en la recuperación simple.

## 5.2 Capital, costos anuales y costos periódicos

Los supuestos en las estimaciones de costos son:

Tabla 4.3. Costos del sistema de intercambio geotérmico horizontal. Elaboración propia.

	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Cantidad	Total	Comentarios
<b>COSTOS INICIALES</b>						
<i>Diseño e ingeniería.</i>						
Reuniones Pre-diseño	Días (8 hrs. de trabajo)	3	\$33	\$ 100.00		
Rediseño de ingeniería	Porcentaje (%)	5	\$80,994	\$ 4,049.70		
Supervisión de la construcción.	Días (8 hrs. de trabajo)	3	\$33	\$ 100.00	\$ 4,249.70	
<i>Equipo e instalación</i>						
Costo de instalación	ft2	42,334	\$ 11.50	\$ 486,841.00		Dentro del Edificio
Perforación y zanjas	ft2	14,000	\$ 1.25	\$ 17,500.00		
Pruebas de flujo		1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00		
bombas y controles	kW	7	\$ 750.00	\$ 10,851.00		
Placas intercambiadoras de calor	kw	403	\$ 12.50	\$ 5,037.00		
Sistema convencional de aire acondicionado	ft2	-42,334	\$ 11.00	\$ 465,674.00-	\$ 56,055.00	Instalaciones actuales
					<b>\$ 60,304.70</b>	
<b>COSTOS ANUALES</b>						
Ahorro de energía				\$ 17,880.00		
Ahorro incremental de mantenimiento	ft2	42,334	\$ 0.03-	\$ 1,058.35-	\$ 16,821.65	\$0.075 usd/ ft2 convencional y \$0.10 ft2 para bomba de calor
<b>COSTOS PERIODICOS</b>						
	Años					
Reemplazo condensador	17			\$ 55,000.00		
Bomba	20			\$ 25,000.00		

La primera sección de la tabla muestra los costos iniciales o de capital, los primeros costos son el rediseño y la ingeniería adicional. El costo de capital del sistema de climatización convencional fue tomada del documento de análisis de factibilidad en edificios escolares (R.S. Means, 2006). El costo de instalación se

toma en \$11.00 usd/ ft<sup>2</sup> ya que este costo actualmente ya esta asumido por el edificio de posgrado, por lo que este costo se resto del costo de instalación dentro del edificio del sistema de intercambio geotérmico. El costo de capital del sistema de intercambio geotérmico fue estimado de dos casos en edificios de nuevas escuelas en Utah (GHC, 2005). También se muestran los costos adicionales de la perforación, pruebas, costos de la instalación de la bomba, etc. Por lo que el costo total del sistema de intercambio geotérmico de tipo horizontal es de \$60,304.70 usd.

La tercera sección de la tabla resume los costos anuales. El ahorro de energía se toma de la tabla anterior. Los costos de mantenimiento y reparación se estiman a partir del documento realizado por Martin, Et al. (2000). Y en la cuarta sección de la tabla se describen los costos periódicos de los sistemas de climatización, los cuales son costos de reemplazo, ya que los costos de reparación están incluidos en los costos de mantenimiento. El aire acondicionado convencional tiene un ciclo de vida de 15 a 20 años. Por lo que se estimo un costo de \$15,000 usd por el reemplazo de las unidades de condensación (R.S. Mean, 2006). También se supuso que del sistema de intercambio geotérmico, las mangueras de circulación, el intercambiador de calor será necesario reemplazarlo a los 20 años.

### **Valor Presente (VP) y periodo de recuperación (simple payback) de los sistemas de climatización.**

Para obtener el valor presente se realizaron los siguientes supuestos económicos:

- Tasa de incremento del costo anual de la energía: 2%
- Tasa de incremento del costo anual de mantenimiento: 2%
- Tasa de descuento: 8%
- Tiempo de vida del proyecto: 50 años.

La viabilidad de un sistema de intercambio geotérmico es mejor comprendido con un enfoque de recuperación simple, dada la volatilidad de los materiales y de la energía. Los valores actuales y los periodos de recuperación de la inversión, junto con otros costos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.4. Valor presente y periodo de recuperación. Elaboración propia.

Sistema de climatización.	Costo total de capital	Costos anuales		Costos periódicos	Recuperación simple (años)	Valor Presente Neto de costo años del ciclo vida del proyecto
		Energía	Mantenimiento			
Sistema de climatización convencional	\$ 465,674.00	\$25,966.00	\$3,541.00	\$55,000 (año 17)	No aplica porque ya se cuenta con este sistema.	\$1,001,776
Sistema de intercambio geotérmico.	\$525,978.70	\$8,086.00	\$4,721.00	\$25,000 (año 20)	<b>6.5</b>	\$750,659

Como se ve en la tabla, el sistema de intercambio geotérmico tiene un Valor Presente Neto (VP) 33% más bajo que el sistema de climatización convencional. Esto en base a los supuestos del caso, con un periodo de recuperación simple (simple payback) de 6.5 años.

## 6. Análisis de sensibilidad de los parámetros.

Con el fin de cuantificar la incertidumbre en las estimaciones de costos del sistema de intercambio geotérmico un análisis de sensibilidad se realizó sobre el periodo de recuperación de la inversión. El costo de los ítems del sistema de intercambio geotérmico se variaron desde -20% a 20% del caso base (mencionados en el Factor 5), los resultados del análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 4.17.

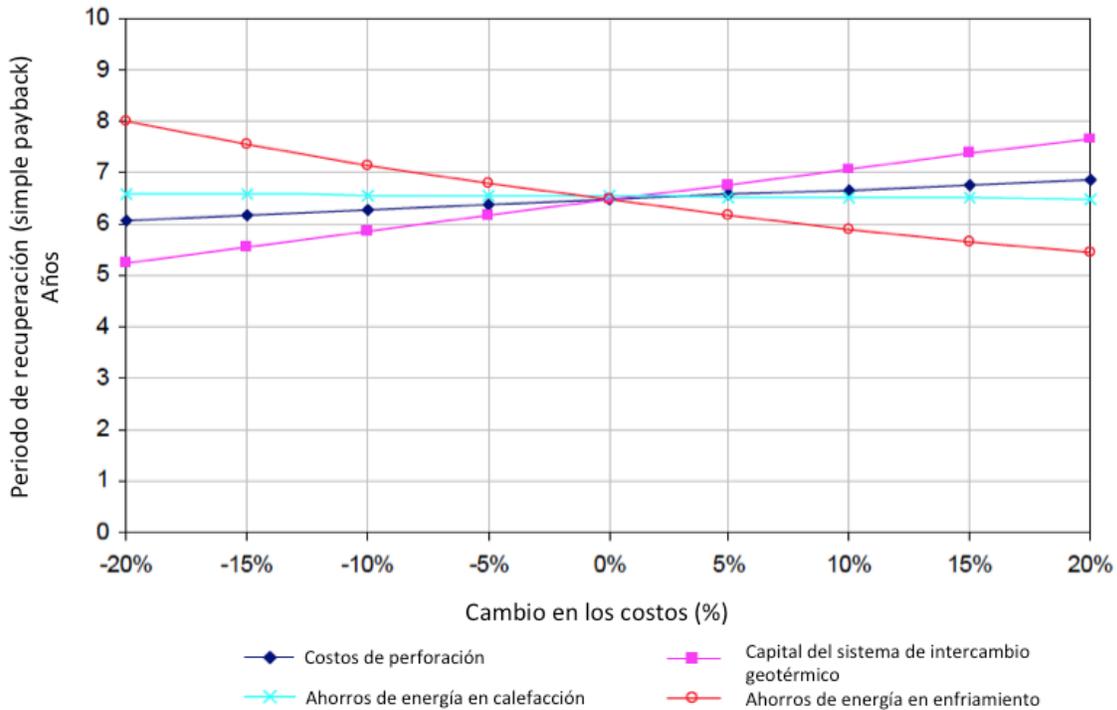


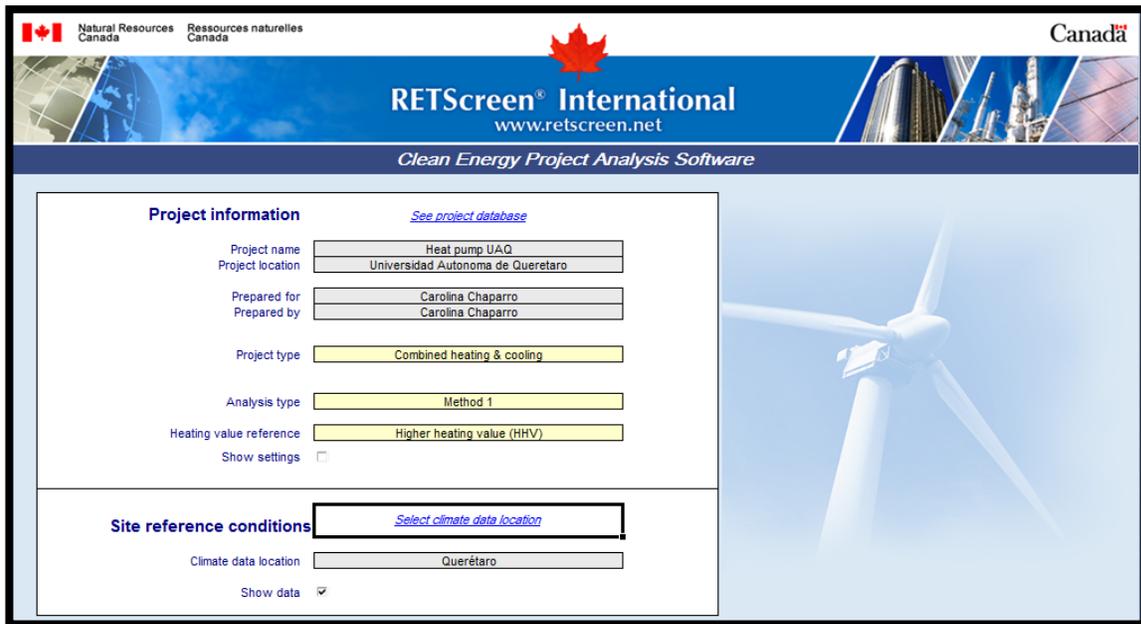
Figura 4.17: Análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.

Este análisis revela que los costos más sensibles del sistema de intercambio geotérmico son los ahorros de energía de enfriamiento y el capital del sistema. El costo de perforación es menos significativo mientras que el ahorro de energía en calefacción es casi insensible debido al bajo número de horas de calefacción. Un cambio del 20% en ahorro de energía en enfriamiento y en capital altera el periodo de recuperación en aproximadamente 1.5 años, en cambio un incremento del 20% en el costo de perforación altera el periodo de recuperación en 6 meses.

## 7. Simulación, con el software disponible.

Las demandas anuales de calefacción y refrigeración del edificio de Posgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro se determina a partir del software de simulación RetScreen donde se realizaron los supuestos de los costos de energía anual del sistema de intercambio geotérmico y el sistema de climatización convencional, con el fin de realizar los análisis.

En la Figura 4.18 vemos el nombre del proyecto, el tipo de proyecto y el tipo de análisis que se realizó.



The screenshot displays the RETScreen International software interface. At the top, there is a header with the Canadian flag, 'Natural Resources Canada' and 'Ressources naturelles Canada', a red maple leaf logo, and the 'Canada' logo. Below this is the 'RETScreen® International' logo and the website 'www.retscreen.net'. The main title is 'Clean Energy Project Analysis Software'. The interface is divided into two main sections: 'Project information' and 'Site reference conditions'. The 'Project information' section includes fields for 'Project name' (Heat pump UAQ), 'Project location' (Universidad Autonoma de Queretaro), 'Prepared for' (Carolina Chaparro), 'Prepared by' (Carolina Chaparro), 'Project type' (Combined heating & cooling), 'Analysis type' (Method 1), and 'Heating value reference' (Higher heating value (HHV)). There is also a 'Show settings' checkbox. The 'Site reference conditions' section includes a 'Climate data location' field (Queretaro) and a 'Show data' checkbox. A large image of a wind turbine is visible on the right side of the interface.

Project information	
Project name	Heat pump UAQ
Project location	Universidad Autonoma de Queretaro
Prepared for	Carolina Chaparro
Prepared by	Carolina Chaparro
Project type	Combined heating & cooling
Analysis type	Method 1
Heating value reference	Higher heating value (HHV)
Show settings	<input type="checkbox"/>

Site reference conditions	
Climate data location	Queretaro
Show data	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 4.18: Información del proyecto. Fuente: RetScreen Software.

Una vez que la información del proyecto es proporcionado, se especifica la ubicación geográfica que se va a analizar, la cual se especifico como el Estado de Querétaro, en la Figura 4.19 podemos observar las temperaturas históricas, así como su humedad, radiación solar, presión atmosférica, velocidad del viento, temperatura de la tierra, etc. Todos estos datos son proporcionados por la NASA y los cuales nos van a servir para la simulación del proyecto propuesto.

		Climate data	Project							
		Unit	location	location						
Latitude	'N	20.6	20.6							
Longitude	'E	-100.4	-100.4							
Elevation	m	2,094	2,094							
Heating design temperature	°C	6.6								
Cooling design temperature	°C	25.7								
Earth temperature amplitude	°C	17.0								
Month	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days	Cooling degree-days		
	°C	%	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d		
January	12.6	59.0%	4.84	81.1	3.3	14.4	166	82		
February	14.4	51.8%	5.86	81.1	3.6	17.0	102	122		
March	17.0	42.1%	6.81	81.0	4.0	20.7	33	215		
April	19.3	42.2%	7.04	80.9	3.8	23.5	0	278		
May	20.2	50.1%	6.81	80.9	3.5	24.2	0	315		
June	18.9	69.4%	6.36	81.0	3.2	21.4	0	268		
July	18.2	71.1%	6.14	81.1	3.1	20.2	0	255		
August	18.2	70.7%	6.06	81.1	2.8	20.1	0	254		
September	17.3	75.3%	5.49	81.0	2.8	18.9	23	218		
October	15.7	74.0%	5.29	81.1	2.9	17.5	71	177		
November	14.2	68.8%	5.09	81.1	3.1	15.8	115	125		
December	12.8	63.8%	4.58	81.2	3.1	14.3	161	87		
Annual	16.6	61.6%	5.86	81.1	3.2	19.0	670	2,396		
Measured at	m				10.0	0.0				

Figura 4.19: Datos climatológicos del proyecto. Fuente: RetScreen Software.

El sistema propuesto es un sistema de intercambio geotérmico, el cual es un sistema de enfriamiento y de calefacción, en la Figura 4.20 se muestra los datos tanto del sistema de enfriamiento y de calentamiento.

Building Heating and Cooling Load		Estimate	Notes/Range
Type of building	-	Commercial	
Available information	-	Descriptive data	
Building floor area	m²	42,334	
Number of floors	floor	3	1 to 6
Window area	-	Standard	
Insulation level	-	Medium	
Occupancy type	-	Daytime	
Equipment and lighting usage	-	Moderate	
Building design heating load	kW	403	
	million Btu/h	1.6	
Building heating energy demand	MWh	1.41	
	million Btu	483	
Building design cooling load	kW	867	
	ton (cooling)	114	
Building cooling energy demand	MWh	3.05	
	million Btu	1,041	

Figura 4.20: Cargas de calefacción y enfriamiento. Fuente: RetScreen Software.

También la Figura 4.21 muestra un análisis de emisiones de gases contaminantes, el cual nos va a ayudar para analizar el beneficio ambiental y ecológico.

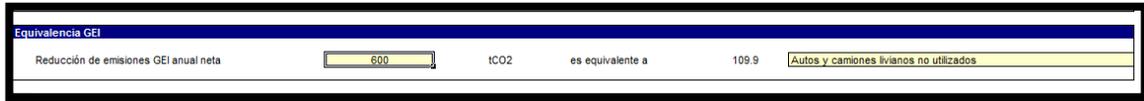


Figura 4.21: Análisis GEI. Fuente: RetScreen Software.

## 8. Análisis cualitativo sobre el beneficio ambiental, ecológico y social sobre este sistema de climatización alterna.

### 8.1 Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero se han atribuido a diversos impactos negativos sobre la calidad del aire y los patrones climáticos globales. Como resultado de ello, las emisiones de carbono se han regulado en algunos lugares del mundo. Los edificios con climatización artificial (como el aire acondicionado convencional) son responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el uso de la electricidad generada por las centrales eléctricas.

Para realizar este análisis sobre el beneficio ambiental generado, se utilizó el software RetScreen, el cual permite calcular la reducción de emisiones de gases del sistema de intercambio geotérmico para el edificio de Posgrado de la Universidad. Por lo que un sistema de intercambio geotérmico es casi 100% renovable. La reducción de gases de efecto invernadero se estima en 60 toneladas de CO<sup>2</sup> por año, lo que equivale a 110 autos y camiones livianos no utilizados, como se muestra en la Figura 4.22.

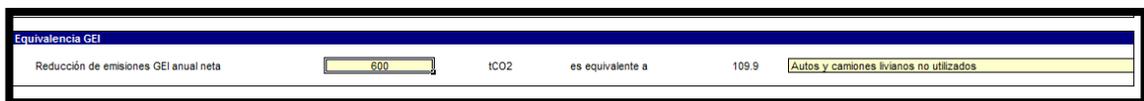


Figura 4.22: Análisis GEI. Fuente: RetScreen Software.

### 8.2 Barreras para la adopción de tecnologías verdes: sistema de intercambio geotérmico.

La adopción de tecnologías verdes (Figura 4.23) implica una inversión en equipos que aumentan la eficiencia en el desempeño en los sistemas de climatización, logrando mayores beneficios económicos y disminuyendo la cantidad de residuos generados. A continuación se muestra un análisis sobre la adopción de tecnologías limpias según el modelo triangular de la adopción de tecnologías verdes (Del Rio, 2003).

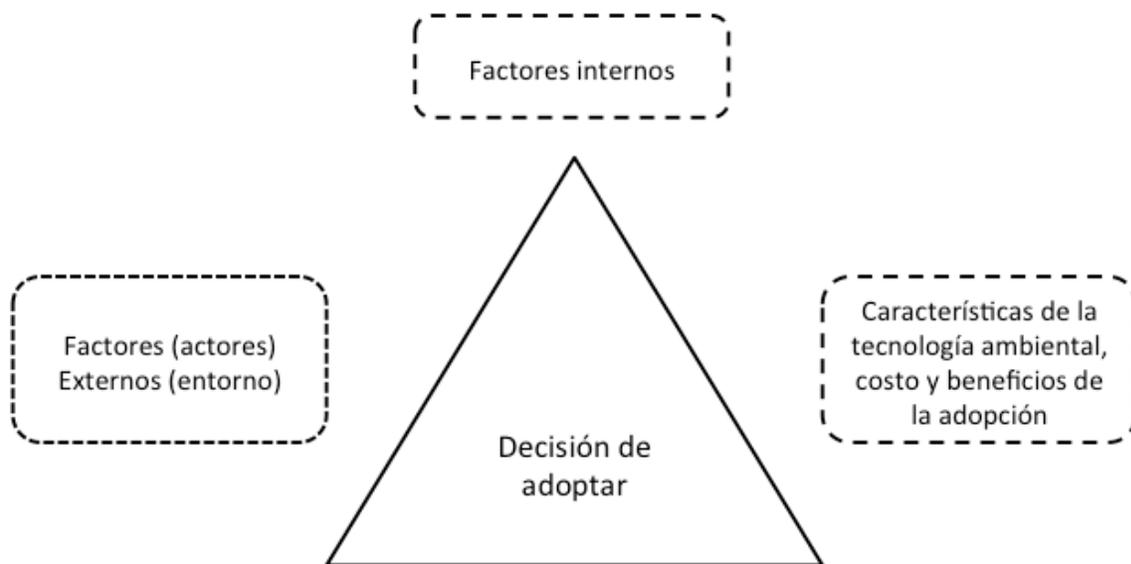


Figura 4.23: El modelo triangular de la adopción de tecnologías limpias. Fuente: La adopción y difusión de tecnologías limpias (Del Rio González Pablo, 2003).

### 1. Factores Internos

Tabla 4.5. Factores internos. Elaboración propia.

<p><b>FACTORES INTERNOS</b></p>	<p>La Universidad Autónoma de Querétaro se encuentra comprometida con la reducción de la huella ecológica, es por ello que se convierte en un adoptante potencial para la implementación de tecnologías verdes, en especial el sistema de intercambio geotérmico en el edificio de posgrado de contabilidad, una vez viendo el ahorro generado en un edificio es posible que se adopte en otros, ya que a lo largo de toda la universidad se cuenta con edificios climatizados con aire acondicionado convencional y esto podría significar un ahorro significativo en la energía eléctrica.</p> <p>A continuación se muestra el análisis en cada factor interno de la Universidad.</p>
	<p>Implementación de la “Agenda del Medio Ambiente y</p>

<p>1. Estrategia Ambiental por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro.</p>	<p>Sustentabilidad (Agenda MAS, 2012) en la UAQ. El Dr. Eusebio Ventura Ramos, director de Vinculación Tecnológica y Proyectos Especiales, comenta que la Agenda MAS es un proyecto que maneja varios ejes de acción, uno de ellos es el <b>ambiental</b>, en el que se buscará que se realicen acciones para contribuir al buen uso de los recursos naturales y así reducir la huella ecológica a través de cuestiones específicas como el reciclajes de residuos y el uso eficiente del agua y la <b>energía eléctrica</b>, entre otras.</p>
<p>2. Capacidad Tecnológica de la UAQ</p>	<p>Para minimizar la falta de competencia tecnológica por parte de la UAQ para asimilar el conocimiento técnico procedente de fuentes externas (capacidad de absorción) de las tecnologías verdes. En noviembre de 2012 personal de la universidad recibió una capacitación impartida por el Dr. Rodolfo Garza, autor del libro “La Sustentabilidad en las Instituciones de Educación Superior” quien ha contribuido a la formación de las agendas ambientales. Sin embargo la universidad tiene una capacidad de absorción mínima sobre el sistema de intercambio geotérmico por lo que deberá aprender sobre su instalación y utilización adecuada. Pero este nivel de absorción le permite ser un adoptante potencial.</p>
<p>3. Tamaño de la UAQ</p>	<p>La universidad es la casa de estudios superiores más grande del Estado de Querétaro, por lo que hay disponibilidad de recursos (Financieros, humanos o técnicos). Es más probable que con una mejor situación financiera sea más fácil adoptar tecnologías limpias, ya que como sabemos este sistema de intercambio geotérmico suele ser un equipo caro y su adquisición exige unos elevados gastos iniciales.</p>
<p>4. Imagen como Universidad Sustentable</p>	<p>La Universidad esta comprometida a tener una imagen verde positiva.</p>

## 2. Factores Externos

Tabla 4.6. Factores externos. Elaboración propia.

<p>FACTORES EXTERNOS</p>	<p>En un informe reciente de la Agencia Internacional de Energía dice que la combinación de los dos tipos de intervención (pública y privada) es necesaria para superar las barreras financieras.</p>
--------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>1. Posibles estímulos e incentivos de financiamiento para la implementación del sistema de intercambio geotérmico en el edificio de posgrado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Subsidios:</b> desde el 2004 se permite a las empresas o personas con actividad empresarial contribuyentes del ISR la deducción acelerada de las inversiones para la obtención de energías renovables.</li> <li>• <b>FIDE</b> (Fideicomiso para el Ahorro de la Energía Eléctrica), es un organismo privado con participación mixta, ofrece múltiples opciones de financiamiento a los usuarios finales, donde la mayoría de los esquemas aprovechan los fondos generados por los ahorros energéticos y ofrece paquetes de incentivos y financiamiento para proyectos en todos los sectores económicos. Puede cubrir hasta el 100% del proyecto y puede cancelarse hasta 3 años. FIDE también financia proyectos de ahorro en la construcción de nuevos edificios, en un programa que considera distintos tipos de equipamiento (aire acondicionado, equipos de calefacción, sistemas de iluminación, sistemas de refrigeración) se otorga un préstamo de hasta US\$200,000 los cuales deben devolverse en un periodo de 3 años. Otro programa de FIDE es financiar el reemplazo de los sistemas de aire acondicionado con un préstamo de hasta US\$180,000, los cuales deberán ser reembolsados independientemente del resultado del proyecto.</li> <li>• <b>BANORTE</b>, realiza prestamos bajo el programa de eficiencia, el rango de créditos va de US\$10,000 a US\$1.2 millones con bajas tasas de interés (tasa interbancaria + margen) mientras que el financiamiento puede ser repagado en un periodo de 18 a 60 meses.</li> <li>• <b>FIPATERM</b>, lanzado junto con FIDE y CONAE el cual se halla orientado a la promoción e instalación de tecnologías ahorradoras de energía (principalmente, aquellas orientadas al sistema de ventilación) en construcciones nuevas.</li> <li>• <b>Fondo Latinoamericano</b>, Programa de energía optima, Clean Tech Fund.</li> <li>• <b>Hipotecas Verdes</b>, INFONAVIT actualmente esta orientada específicamente a financiar la compra de viviendas con menor consumo de electricidad en función de equipamiento incluido y el aislamiento. Se espera que se redirija a otros segmentos de mercado.</li> <li>• <b>NAFIN</b>, otorga una línea de crédito destinado a la mejora ambiental. Los créditos se destinan al financiamiento de la inversión, hasta un 80% de la misma, con un periodo de repago de hasta 10 años</li> </ul>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	con 2 de gracia, observándose valores promedios de US\$500 mil.
2. Regulaciones ambientales	Consejo Mexicano de Edificación Sustentable es una asociación civil miembro del World Green Building Council quienes otorgan la certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design USGBC certification). LEED es un sistema de certificación de edificios ecológicos, cuenta con cuatro niveles de certificación. Certificado LEED, Nivel Plata, Nivel Oro, Nivel Platino. Ofrece un reconocimiento y estimula la competencia ecológica.

### 3. Características de la tecnología ambiental, costo y beneficio de la adopción.

El modelo triangular de adopción de tecnologías verdes considera que se tomen en cuenta las características tecnoeconómicas ya que influyen en el grado de adopción y en la velocidad a la que esta tiene lugar.

A continuación, en la Tabla 4.7 se muestran las principales barreras para la adopción del sistema de intercambio geotérmico.

Tabla 4.7. Características de la tecnología ambiental y beneficios de la adopción. Elaboración propia.

Incertidumbre y riesgo	<p>Ambos en la adopción son altos, ya que existe una incertidumbre del mercado (proveedores, instaladores en México).</p> <p>Existe una incertidumbre técnica (se tiene una ignorancia sobre el funcionamiento del sistema de intercambio geotérmico y sobre los costos de mantenimiento).</p> <p>En México no es una tecnología madura, por lo que se tiene que contratar a personas con el conocimiento de otros países para su instalación y capacitación, por lo que el costo puede ser alto.</p> <p>La evolución de esta tecnología puede ser rápida, ya que en otros países es una tecnología madura.</p> <p>Riesgo e incertidumbre en la estimación de costos, ya que cada proyecto es único en diseño e instalación, por lo que es difícil para los instaladores dar cotizaciones, por lo que los costos son aumentados para minimizar el riesgo e incertidumbre.</p>
Inversión	La adopción de las tecnologías verdes, en este caso el sistema de intercambio geotérmico provoca mayores inversiones iniciales, por lo que puede ser posible que la

	UAQ no cuenta con los recursos financieros necesarios para llevar a cabo su instalación.
Rentabilidad	La rentabilidad se verá reflejada en mediano/largo plazo, mientras los costos serán absorbidos a corto plazo por la Universidad.
Legislación Ambiental	Podría convertirse en la principal barrera para la adopción de esta tecnología verde, debido a la falta de legislación ambiental en edificios sustentables. Además de la falta de difusión e incentivos de apoyo para la instalación del sistema de intercambio geotérmico.

Para minimizar las barreras de adopción del sistema de intercambio geotérmico se realizó un análisis sobre cada barrera.

Es importante conocer todos los actores que añaden valor en la tecnología del sistema de intercambio geotérmico ya que de esta forma identificamos las formas de generar beneficios para el cliente, el cual en este caso es la Universidad Autónoma de Querétaro, en específico el Edificio de Posgrado de Contabilidad. A continuación la Figura 4.24 muestra la cadena de valor generada para el sistema de intercambio geotérmico.

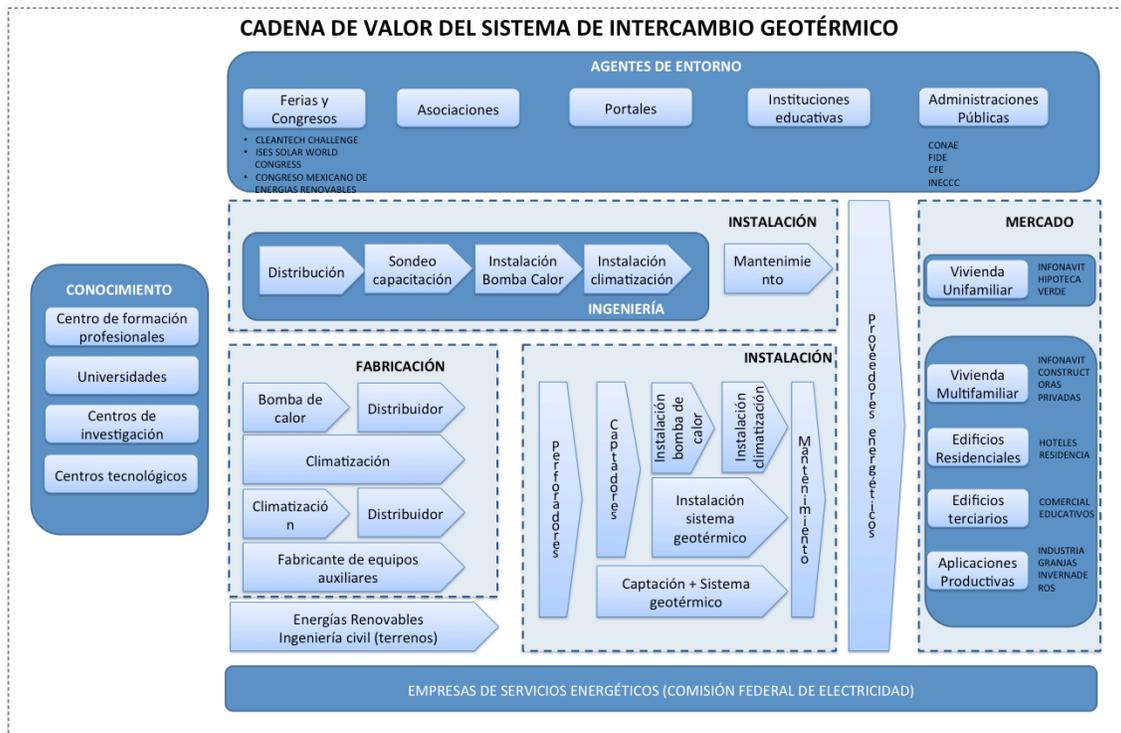


Figura 4.24: Cadena de valor del sistema de intercambio geotérmico Fuente: Elaboración propia.

Los beneficios posibles con la adopción del sistema de intercambio geotérmico (tecnología verde) en el Edificio de Posgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro son:

Tabla 4.8. Beneficios sociales y ambientales de la adopción del sistema de intercambio geotérmico. Elaboración propia.

	Beneficio Social	Beneficio Ambiental
Edificio de Posgrado de Contaduría de la Universidad Autónoma de Querétaro.	Creación de una conciencia de protección al medio ambiente en toda la comunidad de la UAQ (como parte de su Agenda MAS)	Certificación LEED
	Creación de una imagen respetuosa con el medio ambiente.	Menor impacto al medio ambiente mediante la reducción de emisión de CO <sub>2</sub>
	Reducción de la emisión de contaminantes causante de enfermedades.	Disminución del uso de energía eléctrica en la climatización del edificio.
	Difusión de la implementación de tecnologías verdes (sistema de intercambio geotérmico) dentro de sus edificios mediante medios electrónicos (internet).	Cumplimiento de la legislación ambiental.

## 5. CONCLUSIÓN

Se realizó un análisis de factibilidad del sistema de intercambio geotérmico en el edificio de posgrado de Contaduría y Administración de la Universidad Autónoma de Querétaro comparando con el sistema de aire acondicionado convencional que actualmente utilizan el cual es de la marca Carrier. De este análisis se puede concluir que:

- Los costos de instalación dentro del edificio, que equivalen a \$11 usd/ ft<sup>2</sup> ya están absorbidos por el sistema convencional, solo faltaría la instalación entre la conexión de cada sistema independiente para hacerlo uno solo.
- De acuerdo a la hidrogeología y el espacio disponible el sistema de intercambio geotérmico que más se adecua es el sistema horizontal, ocupando la parte posterior del edificio, donde se localiza el estacionamiento, la perforación de 8 ft (2.5 mts. aprox.).
- El sistema de intercambio geotérmico ofrece un ahorro de \$17,880 usd en el pago anual de energía eléctrica en comparación con el sistema de climatización convencional (Carrier).
- Este ahorro de energía se debe a la eficiencia de la bomba de calor.
- El sistema de intercambio geotérmico tiene un ciclo de vida de 50 años por lo que es 33% mas barato que el sistema de climatización convencional (Carrier).
- El periodo de recuperación del sistema de intercambio geotérmico es de 6.5 años.
- El factor mas sensible en el periodo de recuperación es el incremento del capital del sistema y el costo del enfriamiento, el costo de la perforación es un poco menos sensible y el menos sensible es el costo de calefacción, esto debido al poco o casi nada de uso de la calefacción.
- Un cambio del 20% en los costos (capital y enfriamiento) afecta el periodo de recuperación en 1.5 años y un cambio del 20% en los costos de perforación solo afecta el retorno de recuperación en un aumento de 6 meses.

- Utilizar el sistema de intercambio geotérmico como sistema de climatización en el edificio significaría una reducción de 60 toneladas de CO2 por año lo que equivale a no utilizar 110 carros o camiones.

Sin embargo en México el sistema de intercambio geotérmico todavía no es conocido y los costos tanto de instalación como del equipo (bomba de calor) son muy altos. Hace falta el apoyo económico como las subvenciones, como se mencionó en el modelo de adopción para que el periodo de recuperación de la inversión sea menor, además de que falta una legislación mexicana sobre la construcción de edificios verdes.

Los retos que tiene el sistema de intercambio geotérmico para su instalación en edificios comerciales son los siguientes:

1. Difusión del sistema de intercambio geotérmico como alternativa de climatización en Querétaro.
2. Necesidad de contar con proveedores/ instaladores locales.
3. Necesidad de regulación ambiental en edificios comerciales.
4. Conseguir un nivel de calidad del sistema como en los países desarrollados.
5. Eliminar los costos iniciales de instalación como barrera de adopción.
6. Certificación de los instaladores por parte de organismos oficiales de la bomba geotérmica (Geoexchange).

Estos retos tienen los siguientes objetivos:

1. Difusión del sistema de intercambio geotérmico.
2. Creación de una red de instaladores especializados.
3. Regulación ambiental en edificios sustentables.

El impulsor de estos retos son:

1. Eficiencia energética en los edificios comerciales.
2. Aparición de nuevos modelos de negocios.

Por lo tanto las acciones que se tienen que realizar para impulsar el sistema de intercambio geotérmico como una alternativa para climatizar edificios son:

1. Presentar el sistema de intercambio geotérmico en el Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana, como un alternativa de climatización.
2. Difusión a prescriptores (organismos públicos CONAE) y proveedores (instaladores).
3. Difusión tecnológica a instaladores.
4. Aceleración del proceso de aprendizaje técnico (para minimizar la incertidumbre).
5. Legislación ambiental en edificios sustentables.
6. Programa de incentivos y/o subsidios para la implementación del sistema.
7. Sistema de vigilancia tecnológica.
8. Nuevos modelos de negocios.
9. Integración de la cadena de valor.

Si las acciones son cumplidas el panorama futuro sobre el sistema de intercambio geotérmico es una participación significativa en el mercado y mayor será en el caso de los edificios comerciales, ya que a través de la vigilancia tecnológica se podrán ofrecer equipos (bomba de calor) con una mayor eficiencia energética requerida por los edificios, logrando mayores ahorros económicos, debido a la optimización del consumo gracias a adopción de criterios de eficiencia energética y por la aparición de nuevos modelos de negocios.

En México, en especial en Querétaro es necesario crear la cadena de valor sobre este sistema empezando desde los creadores del conocimiento (Universidades, centros de investigación), los fabricantes, instaladores, identificando nuevos mercados y creando nuevos modelos de negocio.



## REFERENCIAS

**Battocletti E. Lawrence B.** 2010. Measuring the cost and benefits of nationwide geothermal heat pump deployment. Obtenido el 20 de septiembre de 2012, desde: <http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull29-3/art2.pdf>

**Calthermic.** 2010. Confort térmico. Obtenido el 20 de septiembre de 2011, desde: <http://www.calthermic.com/confort.swf>

**Carrier.** 2010. Confort térmico. Obtenido el 20 de septiembre de 2011, desde: <http://www.calthermic.com/confort.swf>

**Clima en Querétaro.** 2011. Días con valores históricos extremos durante el año 2011. Obtenido el 10 de marzo de 2012, desde: [http://www.tutiempo.net/clima/Queretaro\\_Qro/2011/766250.htm](http://www.tutiempo.net/clima/Queretaro_Qro/2011/766250.htm)

**Chiasson, A.** 2006. Final report feasibility study of a geothermal heat pump system Lapwai Middle-High school. Obtenido el 5 de diciembre de 2011, desde [http://www.energy.idaho.gov/informationresources/d/nez\\_perce\\_geo\\_heat\\_pump\\_feasibility\\_study.pdf](http://www.energy.idaho.gov/informationresources/d/nez_perce_geo_heat_pump_feasibility_study.pdf)

**Del Rio González, Pablo.** 2003. La adopción y difusión de tecnologías limpias. Obtenido 20 de Febrero de 2013, desde: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/10419/1/03PABLODELRIO.pdf>

**Diario Oficial de las Comunidades Europeas.** 2002. Directiva 2002/91/CE. Obtenido el 05 de diciembre de 2011. Desde: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0065:ES:PDF>

**García C. E., H. A. Valdez.** 2006. Brújula de compra, aires acondicionados para el hogar. Obtenido el 12 de marzo de 2012, desde: [http://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj\\_2006/bol20\\_aire\\_acon.asp](http://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj_2006/bol20_aire_acon.asp)

**Ecohabitar.** 2004. Climatización geotérmica. Obtenido el 7 de junio del 2011 desde: <http://www.ecohabitar.org/articulos/tecnoapropiadas/geotermica.html>

**Saldaña N.** 2011. Reportan cobro excesivo de luz en Querétaro. Obtenido el 6 de abril de 2012, desde: <http://eleconomista.com.mx/sociedad/2011/06/01/reportan-cobro-excesivo-luz-queretaro>

**Energy Saver.** 2011. Geothermal heat pump. Obtenido el 20 agosto de 2011, desde: [http://www.energysavers.gov/your\\_home/space\\_heating\\_cooling/index.cfm/mytopic=12640](http://www.energysavers.gov/your_home/space_heating_cooling/index.cfm/mytopic=12640)

**Fernández G. F.** 1994. Clima y confortabilidad humana. Aspectos metodológicos. Obtenido el 21 de octubre de 2011, desde: <http://titulaciongeografia-sevilla.es/web/contenidos/profesores/materiales/archivos/articuloconfort.pdf>

**Fórum de Geotermia.** 2010. La energía geotérmica. Obtenido el 25 de noviembre de 2011, desde: [http://www.forumgeotermia.com/esp/la\\_energia\\_geotermica.pdf](http://www.forumgeotermia.com/esp/la_energia_geotermica.pdf)

**Geoexchange.** 2011. Geothermal HVAC. Obtenido el 02 de agosto de 2011 desde: [http://www.geoexchange.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=375&Itemid=32](http://www.geoexchange.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=375&Itemid=32)

**Geoexchange.** 2011. The facts about Geoexchange systems. Obtenido el 7 de diciembre de 2011, desde: [http://www.geoexchange.ca/en/geoexchange\\_key\\_facts\\_p11.php](http://www.geoexchange.ca/en/geoexchange_key_facts_p11.php)

**Geoexchange.** 2011. Geoexchange heating and cooling systems: Fascinating Facts. Obtenido el 7 de diciembre de 2011 desde: <http://www.geoexchange.org/downloads/GB-003.pdf>

**Geotermia Solar.** 2008. ¿Por qué geotermia? Obtenido el 02 de junio de 2011 desde: [http://www.geotermiasolar.com/Geotermia\\_esp.html](http://www.geotermiasolar.com/Geotermia_esp.html)

**Halfhide T., S. MacDonald, J. McLane, S. Titcomb.** 2009. A feasibility study of geothermal heating and cooling at Colgate University. Obtenido el 3 de octubre del 2011 desde: <http://www.colgate.edu/portaldata/imagegallerywww/d0f441dc-098d-4190-9faa-348b1c72ee56/ImageGallery/Geothermal%20Final%20Report.pdf>

**Instituto Nacional de Ecología.** 2010. ¿Qué es el fenómeno del cambio climático? Obtenido el 15 de marzo de 2012, desde: [http://cambio\\_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/queeselcc/queeselcc.html](http://cambio_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/queeselcc/queeselcc.html)

**Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal.** 2005. Enciclopedia de los Municipios de México. Obtenido el 21 de octubre del 2011, desde: <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/queretaro/>

**Instituto Nacional de Ecología.** 2010. El cambio climático en México, Querétaro proyecciones del clima. Obtenido el 20 de octubre de 2011, desde: [http://www2.ine.gob.mx/cclimatico/edo\\_sector/estados/futuro\\_queretaro.html](http://www2.ine.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/futuro_queretaro.html)

**LEED** 2013. LEED: certification. Obtenido el 28 de mayo de 2013, desde: <http://www.usgbc.org/leed/certification>

**Lienau P. J., T. L. Boyd, R. L. Rogers.** 1995. Ground-source heat pump case studies and utility programs. Obtenido el 28 de noviembre de 2011, desde: <http://geoheat.oit.edu/pdf/hp1.pdf>

**Granados L.** 2011. Brújula de compra, cómo comprar aires acondicionados. Obtenido el 12 de abril de 2012, desde: [http://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj\\_2011/bol195\\_aires.asp](http://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj_2011/bol195_aires.asp)

**Metropoli.** 2012. Implementará UAQ agenda MÁS. Obtenido el 12 de abril de 2013, desde: <http://www.eluniversalqueretaro.mx/metropoli/25-11-2012/implementara-uaq-agenda-mas>

**Mondelo, R. P., E. T. Gregori, S. U. Comas.** 1999. Ergonomía 2. Confort y estrés térmico. Obtenido el 22 de octubre de 2011. Desde: [http://books.google.es/books/about/Ergonom%C3%ADa\\_2.html?id=2N0jNvsNFyQC](http://books.google.es/books/about/Ergonom%C3%ADa_2.html?id=2N0jNvsNFyQC)

**NASA CR-1205-1.** 1976. A compendium of Human Responses to the Aerospace Environment. Obtenido el 15 de octubre de 2011, desde:

[https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:bjxVhkSKpOYJ:www.polarhide.com/HeatPproductivity\\_NASA.pdf+NASA+Report+CR-1205-1&hl=en&gl=us&pid=bl&srcid=ADGEESjTORCAM4fDbiqENL88ARj8YZQVV2bBNISESUa03zVmOx3FM2wJRSCAfO6wHIUik\\_EwFLyN-4-4q4t23s1a1Nu2WyBhonAlmBe1FiMdD0AY0fldt1gZUW6soWgic1eEyuLlebDP&sig=AHIEtbT\\_GVIsQVphEPZaxuzztpIWdK9sIA](https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:bjxVhkSKpOYJ:www.polarhide.com/HeatPproductivity_NASA.pdf+NASA+Report+CR-1205-1&hl=en&gl=us&pid=bl&srcid=ADGEESjTORCAM4fDbiqENL88ARj8YZQVV2bBNISESUa03zVmOx3FM2wJRSCAfO6wHIUik_EwFLyN-4-4q4t23s1a1Nu2WyBhonAlmBe1FiMdD0AY0fldt1gZUW6soWgic1eEyuLlebDP&sig=AHIEtbT_GVIsQVphEPZaxuzztpIWdK9sIA)

**NYSERDA.** 2007. Information for evaluating geoexchange applications. Obtenido el 7 de junio de 2011, desde: [www.nyserda.com/programs/geothermal-geothermal\\_manual.pdf](http://www.nyserda.com/programs/geothermal-geothermal_manual.pdf)

**Pedraza H. E.** 2008. Estadísticas e indicadores de Energía como herramienta para el Desarrollo de Políticas Públicas. Obtenido el 15 de abril de 2012, desde:

[http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/6153/2/estadisticas\\_indicadores\\_energia.pdf](http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/6153/2/estadisticas_indicadores_energia.pdf)

**Pérez D., C. Aceves.** 2011. Análisis de la bomba de calor geotérmica en el panorama energético español. Obtenido el 5 de diciembre de 2011, desde: [http://www.caloryfrio.com/archivos-cyf/pdf/ponencias/Ponencia\\_geoener21.pdf](http://www.caloryfrio.com/archivos-cyf/pdf/ponencias/Ponencia_geoener21.pdf)

**Rehabitar.** 2003. La calefacción geotérmica. Obtenido el 6 de junio de 2011, desde:

[http://www.probicosl.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=35&Itemid=51](http://www.probicosl.com/index.php?option=com_content&task=view&id=35&Itemid=51)

**SEER.** 2013. Seasonal energy efficiency ratio. Obtenido el 24 de mayo de 2013, desde: [https://en.wikipedia.org/wiki/Seasonal\\_energy\\_efficiency\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Seasonal_energy_efficiency_ratio)

**Tornero, J., A. J. Pérez, F. Gómez.** 2006. Ciudad y confort ambiental: Estado de la cuestión y aportaciones recientes. Obtenido el 24 de octubre de 2011, desde: [http://www.uv.es/cuadernosgeo/CG80\\_147\\_182.pdf](http://www.uv.es/cuadernosgeo/CG80_147_182.pdf)

**UNEP, Grid arendal, Environmental Knowledge for Change.** 2011. Trend in Global average surface temperature. Obtenido el 8 de octubre de 2011, desde: <http://www.grida.no/publications/vg/climate/page/3070.aspx>

**UNEP, Grid arendal, Environmental Knowledge for Change.** 2011. Trend in Global average surface temperature. Obtenido el 8 de octubre de 2011, desde: <http://www.grida.no/publications/vg/climate/page/3062.aspx>

**UNEP, Grid arendal, Environmental Knowledge for Change.** 2011. Trend in Global average surface temperature. Obtenido el 8 de octubre de 2011, desde: <http://www.grida.no/publications/vg/climate/page/3058.aspx>

**U.S. Department of Energy,** 2008. Energy efficiency trends in residential and commercial buildings. Obtenido el 8 de octubre de 2011, desde: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/corporate/bt\\_stateindustry.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/corporate/bt_stateindustry.pdf)

# **APENDICE**

## **APENDICE A**

### **Elección del fluido circulante**

El fluido circulante por el intercambiador de calor enterrado es agua o agua con anticongelante, si se prevé en diseño que el intercambiador geotérmico puede tener riesgo de congelación (elevado funcionamiento en calefacción, temperaturas frías de terreno, etc.). La elección del fluido dependerá de distintos factores:

1. Características de transferencia de calor (conductividad térmica y viscosidad)
2. Punto de congelación
3. Requerimientos de presión y caídas de presión por rozamiento
4. Corrosividad, toxicidad e inflamabilidad
5. Costo

### **Elección de los materiales**

El polietileno (PE) y polibutileno (PB) son los materiales más comunes en los intercambiadores de calor enterrados. Ambos son flexibles a la vez que resistentes y pueden unirse mediante fusión por calor para formar empalmes más fuertes que el tubo mismo. En la tabla se recogen las características de los tubos para distintas presiones de trabajo. El espesor de las paredes y consecuentemente la resistencia del tubo se define en términos de Schedule Rating (SCH) o Size Dimension Ratio (SDR).

### **Elección del diámetro**

Para la selección del diámetro de las tuberías se debe llegar a un compromiso entre la caída de presión y el funcionamiento térmico, ya que éste:

1. Debe ser lo suficientemente grande para producir una pérdida de carga pequeña y así necesitar menor potencia de bombeo.
2. Debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar altas velocidades y así garantizar turbulencia del fluido dentro del tubo, de manera que se favorezca el traspaso térmico entre el fluido que circula y la pared interior. Cuanto mayor sea la turbulencia mayor será el intercambio térmico. La condición que asegura la turbulencia es:

$$Re = \frac{4Q}{\pi \nu D} > 2.300$$

Donde Re es el número de Reynolds que caracteriza si un flujo es turbulento o laminar, Q el caudal (m<sup>3</sup>/s), D el diámetro del tubo (m) y  $\nu$  la viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s).

### **Estudio de temperaturas**

Tanto el polietileno (PE) como el polibutileno (PB) se comportan adecuadamente a las temperaturas de trabajo del intercambiador de calor, fijadas por la bomba de calor, y que dependen del punto de trabajo de la bomba de calor seleccionada. Cuando la bomba de calor está en modo calefacción (produciendo en el condensador agua caliente para suministrar al edificio entre 45-55 °C), en el evaporador se produce agua fría a unos 5-15 °C, que es la que circula por las tuberías del intercambiador de calor enterrado. En refrigeración, cuando la bomba de calor produce frío en el evaporador, a una temperatura comprendida entre 7-12 °C, por las tuberías del intercambiador enterrado circulará el agua de intercambio de calor con el condensador a unos 25-35 °C.