

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

Diseño optimizado de sistemas geotérmicos para remoción de calor en  
edificaciones de ciudades con climas húmedos y tropicales

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Clemente Antonio Calderón Orellana

Manuel Elias Orellana Cedeño

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres, por su apoyo y esfuerzo que me brindaron a lo largo de este camino. A mi hermana por sus consejos. A mis amigos que siempre me animaron a seguir adelante y a los profesores por sus conocimientos y tiempo entregado.

### **Clemente Calderón Orellana**

El presente trabajo se lo dedico principalmente a mis padres quienes fueron el pilar en mi educación, a mis hermanos por sus consejos y apoyo. A mis sobrinos que me generan esperanza en el futuro. A mis amigos quienes fueron partícipes en esta etapa, y a la institución ESPOL y sus profesores que han sido factores importantes en mi desarrollo académico y profesional.

### **Manuel Orellana Cedeño**

## **AGRADECIMIENTOS**

Le damos gracias a Dios por permitirnos culminar esta etapa universitaria, a nuestras respectivas familias por su apoyo incondicional durante el proceso de formación profesional en especial a nuestros padres, un especial agradecimiento a nuestros tutores PhD. Soriano y al Msc. Macías que mediante su asesoría se culminó la tesis, al laboratorio de LABET por permitirnos usar sus instalaciones y a la PhD. Delgado y al PhD. Peralta por sus consejos en el transcurso del proyecto.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Clemente Antonio Calderón Orellana* y *Manuel Elias Orellana Cedeño* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Clemente Calderón Orellana



Manuel Orellana Cedeño

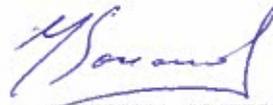
## EVALUADORES



---

PhD. Emerita Delgado

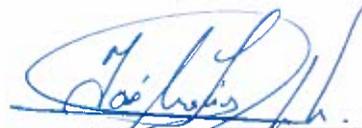
PROFESOR DE LA MATERIA



---

PhD. Guillermo Soriano

PROFESOR TUTOR



---

Msc. José Macías

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

En el presente proyecto se busca determinar la viabilidad de sistemas geotérmicos de tipo vertical en el edificio del gobierno de litoral de Guayaquil como alternativa a las torres de enfriamiento con la finalidad de obtener ahorros energéticos. Para esto se desarrolló un modelo energético calibrado del edificio del Gobierno Litoral usando de referencia los índices aceptación descritos en el ASHRAE 14. Para el diseño de intercambiadores geotérmicos se utilizó como guía el manual del INER y la guía de Kavanaugh y Rafferty, la carga térmica de diseño fue determinada mediante la línea base del edificio. Los sistemas propuestos se simularon en TRNSYS con la finalidad de estimar su comportamiento en operación y determinar los consumos energéticos. Se obtuvo que para un sistema geotérmico se requiere instalar 990 intercambiadores de tipo vertical y para sistemas geotérmicos híbridos el número de agujeros se reduce de manera proporcional a la carga. El rango de ahorro energético obtenido va desde [78-237] MWh que es equivalente al 2.12% a 6.43% del consumo anual. Para el presente caso de estudio y bajo las condiciones actuales la aplicación de este tipo de sistemas como medida alternativa no presentan viabilidad económica, dado que el tiempo de recuperación de la inversión no es atractivo. Se realizó una evaluación de parámetros influyentes para determinar condiciones para que esta tecnología sea viable, se obtuvo que con una reducción en costes de perforación y un aumento en el coste kWh los sistemas híbridos se tornan rentables.

**Palabras Clave:** GSHP, HGCHP, TRNSYS.

## **ABSTRACT**

*The present project seeks to determine the viability of vertical type geothermal systems in the “Gobierno del Litoral” building of Guayaquil as an alternative to cooling towers in order to obtain energy savings. For this, a calibrated energy model of the Litoral Government building was developed, using as reference the acceptance indices described in the ASHRAE 14. For the design of geothermal exchangers, the INER manual and the Kavanaugh and Rafferty guide were used as a guide. The design thermal load was determined by the building's baseline. The proposed systems were simulated in TRNSYS in order to estimate their behavior in operation and determine energy consumption. It was obtained that for a geothermal system it is required to install 990 vertical type exchangers and for hybrid geothermal systems the number of holes is reduced proportionally to the load. The range of energy savings obtained ranges from [78-237] MWh which is equivalent to 2.12% to 6.43% of annual consumption. For the present case of study and under the current conditions, the application of this type of systems as an alternative measure does not present economic feasibility, given that the time of recovery of the investment is not attractive. An evaluation of influential parameters was carried out to determine the conditions for this technology to be viable. It was obtained that with a reduction in drilling costs and an increase in cost kWh hybrid systems become profitable.*

**Keywords:** GSHP, HGCHP, TRNSYS

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del problema .....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Torres de enfriamiento.....	3
1.4.2 Sistemas Geotérmicos.....	4
CAPÍTULO 2.....	7
2. Metodología .....	7
2.1 Caso de estudio: Gobierno Zonal de Guayaquil.....	8
2.1.1 Sistema de climatización actual.....	9
2.1.2 Datos de ocupación del edificio .....	11
2.1.3 Densidad de potencia de equipos.....	12
2.1.4 Densidad iluminación.....	12
2.2 Descripción del problema .....	13
2.3 Requerimientos diseño.....	13
2.3.1 Económico .....	13
2.3.2 Técnico .....	13
2.4 Descripción Alternativas .....	13
2.4.1 Alternativa 1: Sistema Geotérmico (GSHP) .....	14
2.4.2 Alternativa 2: Sistema híbrido geotérmico con torre de enfriamiento (HGSHPs).....	17

2.5	Modelo energético del edificio .....	18
2.5.1	Desarrollo del modelo geométrico .....	18
2.5.2	Cargas internas del modelo .....	19
2.5.3	Estimación del coeficiente convectivo externo.....	20
2.6	Modelo TRNSYS .....	20
2.6.1	Calibración del modelo energético.....	20
2.7	Diseño de sistema geotérmico .....	21
2.7.1	Parámetros considerados .....	21
2.7.2	Dimensionamiento del GSHP .....	22
2.7.3	Rechazo de calor y flujo de agua.....	23
2.7.4	Resistencia térmica del suelo .....	24
2.7.5	Resistencia de la tubería .....	24
2.7.6	Resistencia de Relleno .....	24
2.7.7	Factor de corrección <i>BM</i> .....	25
2.7.8	Selección de bomba para recirculación .....	26
CAPÍTULO 3.....		28
3.	Resultados y análisis .....	28
3.1	Calibración de modelo.....	28
3.1.1	Perfil de uso el chiller.....	29
3.2	Sistema Geotérmico .....	31
3.2.1	Intercambiador enterrado.....	31
3.2.2	Sistema de bombeo .....	32
3.2.3	Inversión .....	33
3.3	Simulación.....	36
3.3.1	Consumo energético carga completa .....	36
3.3.2	Consumo energético de GSHP con sistema auxiliar de torre de enfriamiento. ....	38
3.4	Desempeño Energético .....	38
3.5	Análisis de costos.....	39
3.5.1	Costos operacionales .....	39
3.5.2	Costos de torres de enfriamiento.....	40
3.5.3	Amortización .....	40
3.5.4	Análisis de sensibilidad.....	41
CAPÍTULO 4.....		42

4.	Conclusiones y recomendaciones .....	42
4.1	Conclusiones.....	42
4.2	Recomendaciones.....	45

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES.

## **ABREVIATURAS**

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and A-C Engineers
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CT	Cooling Tower
GSHP	Ground Source Heat Pump
GHX	Ground Heat Exchanger
GHE	Ground Heat Exchanger
HGSHP	Hybrid Ground Source Heat Pump
INER	Instituto de Energías Renovables

## SIMBOLOGÍA

in	Pulgada
ft	Pies
m	Metro
TON	Tonelada de refrigeración
kWh	Kilowatts hora
MWh	Megawatts hora
GWh	Gigawatts hora
BTU	Unidades térmicas británicas
h	Hora
s	Segundo
Gpm	Galones por minuto
F	Grados de temperatura Fahrenheit
K	Temperatura absoluta kelvin
GJ	Giga Joules
C	Grados de temperatura Celsius
W	Watts
MW	Mega Watts
HP	Caballos de fuerza

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Torre de enfriamiento. (Glaciar Ingeniería S.A.S, 2015).....	3
Figura 1.2 Torre de enfriamiento de tiro inducido y forzado. (Pita, 2010).....	4
Figura 1.3 Intercambiador de calor geotérmico vertical. (RETSscreen, 2001) .....	5
Figura 1.4 Configuración interna de tubería. (Schoennenbeck & Villarrubia, 2014) .....	6
Figura 1.5 Intercambiador de calor geotérmico horizontal. (RETSscreen, 2001).....	6
Figura 2.1. Datos de temperatura Guayaquil. (THE WEATHER COMPANY, 2017) .....	7
Figura 2.2 Esquema de realización del proyecto.....	8
Figura 2.3 Fotografía del edificio (izquierda), imagen satelital (derecha). .....	9
Figura 2.4 Esquema de un sistema geotérmico vertical. ....	14
Figura 2.5 Esquema de un HGSHP.....	17
Figura 2.6 Modelo Sketch-up (Derecha), zonas térmicas (izquierda).....	19
Figura 3.1 Consumo energético. ....	28
Figura 3.2 Porcentaje de consumo por equipos. ....	29
Figura 3.3 Temperatura de entrada y salida en el evaporador.....	30
Figura 3.4 Datos de energía en el chiller.....	30
Figura 3.5 Variación del consumo energético en HGSHP y GSHP.....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resumen de equipos de refrigeración.....	10
Tabla 2.2 Equipos de expansión directa.....	11
Tabla 2.3 Registro de promedio de asistencia.....	11
Tabla 2.4 Densidad de equipos.....	12
Tabla 2.5 Densidad de iluminación.....	12
Tabla 2.6 Ponderación de los criterios de selección.....	16
Tabla 2.7 Selección de Mejor Alternativa.....	17
Tabla 2.8 Tolerancias para la calibración del modelo.....	20
Tabla 2.9 Parámetros de ingreso para el GSHP.....	21
Tabla 2.10 Características y propiedades térmicas de tubería HDPE.....	22
Tabla 2.11 Propiedades térmicas del suelo de Guayaquil.....	22
Tabla 2.12 Proporciones de materiales para relleno.....	25
Tabla 3.1 Índices para validación del modelo.....	29
Tabla 3.2 Dimensionamiento de sistemas geotérmicos.....	31
Tabla 3.3 Parámetros de diseño de bombas de circuitos.....	32
Tabla 3.4 Potencias de operación a 33% de carga.....	33
Tabla 3.5 Potencia de operación a 50% de carga.....	33
Tabla 3.6 Costos de tubería y accesorios.....	34
Tabla 3.7 Costos de materiales de relleno.....	34
Tabla 3.8 Costos de maquinaria, perforación y mano de obra.....	35
Tabla 3.9 Inversión sistema geotérmico en Guayaquil.....	35
Tabla 3.10 Inversión para cada porcentaje de carga.....	35
Tabla 3.11 Reporte de consumo energético simulado.....	37
Tabla 3.12 Ahorro energético y económico generado a carga completa.....	37
Tabla 3.13 Desempeño energético de los sistemas geotérmicos.....	39
Tabla 3.14 Costo operacional anual de los sistemas en diferentes cargas.....	39
Tabla 3.15 Relación de precio-capacidad de torres de enfriamiento.....	40
Tabla 3.16 Costo de inversión final y kW instalado de cada sistema.....	40
Tabla 3.17 Amortización entre torre de enfriamiento (CT) y los diferentes sistemas.....	41

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

Actualmente el elevado consumo energético presente en las edificaciones de tipo comercial e industrial se puede atribuir principalmente, más del 40% de este, a la operación de los equipos del sistema de climatización de aire. En climas cálidos como el presente en la ciudad de Guayaquil la disposición del calor de la zona climatizada al exterior se torna ineficiente en métodos convencionales como torres de enfriamiento y condensadores evaporativos, debido a la dependencia de las condiciones del aire circundante como sumidero de calor (Kasten & Muller, 2007) y el uso ineficiente de agua (Chang, 2009).

### 1.2 Justificación del problema

La demanda energética en las edificaciones en la actualidad representa un porcentaje elevado global, la tasa de consumo dependerá del tipo de clima presente en la ciudad en la que se encuentre, en general estará en el rango 30-45% de la energía total demandada (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008). Siendo los sistemas de climatización los responsables del 30-50% del consumo energético en edificaciones de tipo comercial (Ghahramani, Karvigh, & Becerik-Gerber, 2017).

En Ecuador el consumo eléctrico que se tuvo en el año 2012 fue de 12,196 GWh (CONELEC, 2013), siendo la mayor parte de esta suplida por energía hidroeléctrica, si se mejora los sistemas de climatización actuales se alcanzara una reducción significativa al consumo global. Para esto el objetivo del presente trabajo es incorporar las tecnologías geotérmicas para la remoción de calor a baja temperatura usando el suelo como un sumidero de calor con el fin de la reducción del consumo energético en estos sistemas.

Este trabajo se enfocará en realizar una comparación entre el uso de la torre de enfriamiento, un sistema geotérmico para remoción de calor y un sistema híbrido que sea combinación de ambos. Lo que se aprovecha usando los sistemas geotérmicos es eliminar la dependencia de la temperatura ambiente con el proceso de transferencia de calor debido que al usar el suelo como sumidero presenta una temperatura constante a partir de cierta profundidad (Lý, 2015), además presentan un periodo extenso de vida útil y costos generales de mantenimiento menor respecto a las otras tecnologías (Chiasson, 2006).

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar sistemas geotérmicos híbridos y convencionales para la climatización de edificaciones en la ciudad de Guayaquil.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Modelar la línea base del edificio estableciendo un punto de referencia para las simulaciones de sistemas geotérmicos.
2. Proponer sistemas geotérmicos e híbridos para remoción de calor de equipos de climatización.
3. Comparar el desempeño térmico y la viabilidad económica de los diferentes sistemas con respecto al sistema actual del edificio.

### **1.4 Marco teórico**

Toda edificación comercial o residencial que busca tener las óptimas condiciones para que las personas puedan laborar o vivir en un ambiente de confort, utilizan al menos un sistema de climatización. Estos sistemas se conforman por equipos secuenciales con la finalidad de acondicionar el aire al controlar parámetros como la temperatura, humedad, limpieza y entre otros aspectos simultáneamente del espacio a tratar (Wang, 2002).

### 1.4.1 Torres de enfriamiento

Los ciclos de refrigeración constan principalmente de condensadores, ya sean refrigerados por aire o por agua, donde ocurre la primera transferencia de calor (del refrigerante al agua). Para la segunda transferencia de calor se utilizan intercambiadores de placas o torres de enfriamiento (del agua al aire).

Las torres de enfriamiento como se observa en la figura 1.1 son máquinas diseñadas para enfriar grandes cantidades de agua mediante la evaporización, por medio de corrientes de aires y la atomización de agua recirculada la cual aumenta el área de evaporación (Pita, 2010).

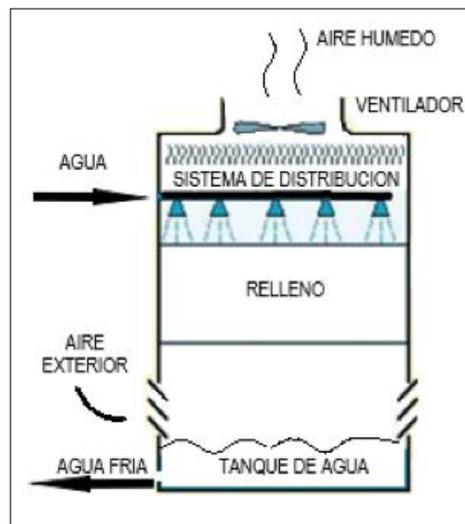


Figura 1.1 Torre de enfriamiento. (Glaciar Ingeniería S.A.S, 2015)

### Clasificación de Torres de Enfriamiento

Las torres de enfriamiento se clasifican en tiro no mecánico y mecánico, refiriéndose a la palabra *tiro* como la diferencia de presión necesaria para que el aire fluya.

Las torres de tiro no mecánico no poseen ventiladores con los cuales producir la diferencia de presión, para esto se utiliza la atracción generada por la aspersion de agua para inducir el movimiento del aire de forma descendente desde la admisión superior de la torre.

Por otro lado, se tienen las torres de tiro mecánico, las cuales cuentan con ventiladores que generen la diferencia de presión necesaria para el movimiento del aire dentro de la torre. En este tipo de torres los ventiladores se pueden encontrar tanto en la parte superior (tiro inducido) o como en la entrada del aire a la torre (tiro forzado). Un esquemático de estas torres se observa en la figura 1.2 (Pita, 2010).

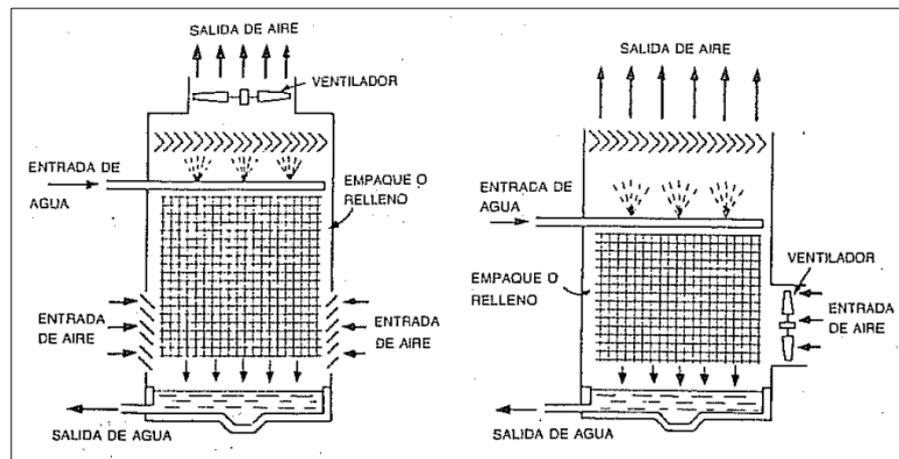


Figura 1.2 Torre de enfriamiento de tiro inducido (izquierda) y forzado (derecha). (Pita, 2010)

#### 1.4.2 Sistemas Geotérmicos

Otra forma de intercambio de calor es mediante sistemas geotérmicos, conocidos también como intercambiadores de calor geotérmicos en los cuales se utiliza al suelo como un sumidero para la disposición de calor o para la captación de este dependiendo de la final para la cual se desea trabajar.

Los sistemas geotérmicos en los cuales se trabajan estos intercambiadores se denominan abiertos y cerrados. Definiéndose como sistema abierto cuando se utiliza como medio de transmisión térmica el agua subterránea, la cual es recopilada por medio de pozos de bombeo y una vez utilizadas por el intercambiador de calor se restituyen al acuífero por medio de otro pozo denominado de inyección el cual está alejado del antes mencionado.

Los sistemas cerrados, contrarios a los abiertos, trabajan también con agua y adicional anticongelante como medio de transmisión de calor con la diferencia que, este fluido circula por un circuito de tuberías de diámetro pequeño. (López, 2015). Para aprovechar tanto los sistemas abiertos y cerrados se utilizan dos clases de intercambiadores de calor geotérmicos o GHE por sus siglas en inglés, los verticales y horizontales.

Los GHE verticales son comúnmente usados para edificios de dimensiones considerables donde existen restricciones con el espacio para la instalación o donde la interrupción del terreno debe ser mínima. En la Figura 1.3 se puede observar una ilustración básica del diseño de estos intercambiadores (Schoennenbeck & Villarrubia, 2014).

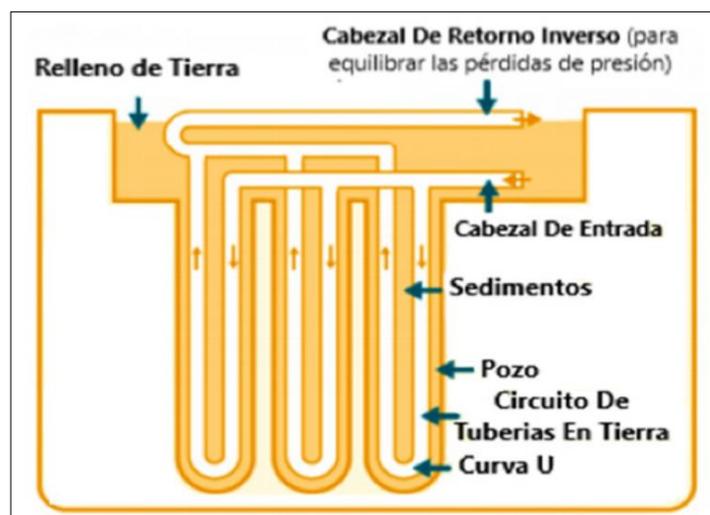


Figura 1.3 Intercambiador de calor geotérmico vertical. (RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre, 2001)

Los pozos en los cuales se instalan estos GHE suelen tener una profundidad entre 45 a 150 m, en cuyo interior se insertan el circuito de tuberías. Las configuraciones de estos circuitos suelen ser simple U, doble U y coaxial como se muestra en la figura 1.4.

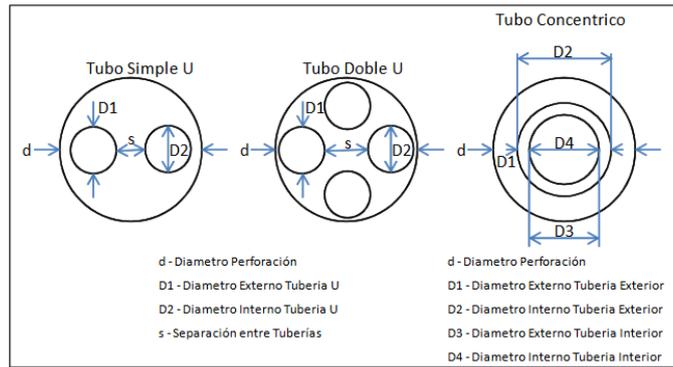


Figura 1.4 Configuración interna de tubería. (Schoennenbeck & Villarrubia, 2014)

Los GHE horizontales por su parte, están constituidos por tuberías apiladas en forma de trincheras, con una profundidad de entre 1 o 2 m. Para obtener una capacidad de 1 kW de calefacción o refrigeración se utilizan entre 35 a 55 m de tuberías (Schoennenbeck & Villarrubia, 2014). Se usan tubos en espiral, también llamados “slinky” cuando el espacio es limitado. Una configuración típica de los GHE horizontales se puede apreciar en la figura 1.5 donde se visualiza la agrupación de las tuberías para un edificio de tipo comercial. Una característica a destacar de los GHE horizontales es el que el costo de instalación es menor con relación a los verticales. Los GHE horizontales dependerán de la superficie del terreno, los cuales deben ser más grande, llevando así a este tipo de instalaciones para zona residenciales y edificios comerciales pequeños.

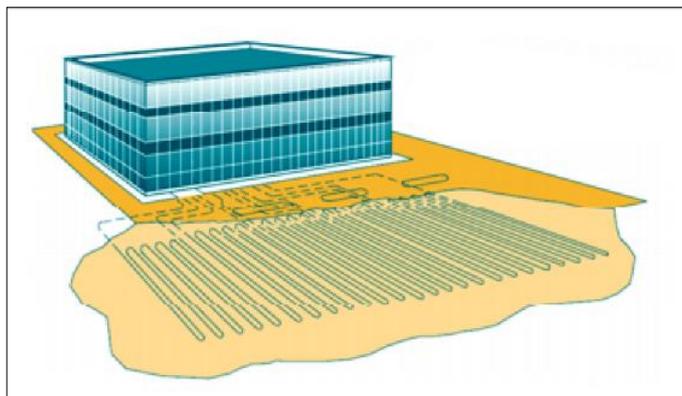


Figura 1.5 Intercambiador de calor geotérmico horizontal. (RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre, 2001)

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

El proyecto actual busca determinar la factibilidad económica del uso de sistemas geotérmicos como sumidero de calor en la ciudad de Guayaquil como alternativa a equipos de remoción de calor tradicionales en ciclos de climatización. Las condiciones climáticas de la urbe se caracterizan por una temperatura, como se puede observar en la figura 2.1 y humedad relativa elevada lo que implica un mayor trabajo en las torres de enfriamiento y condensadores evaporativos usados para transferir el calor al ambiente, como se describió en el capítulo 1.

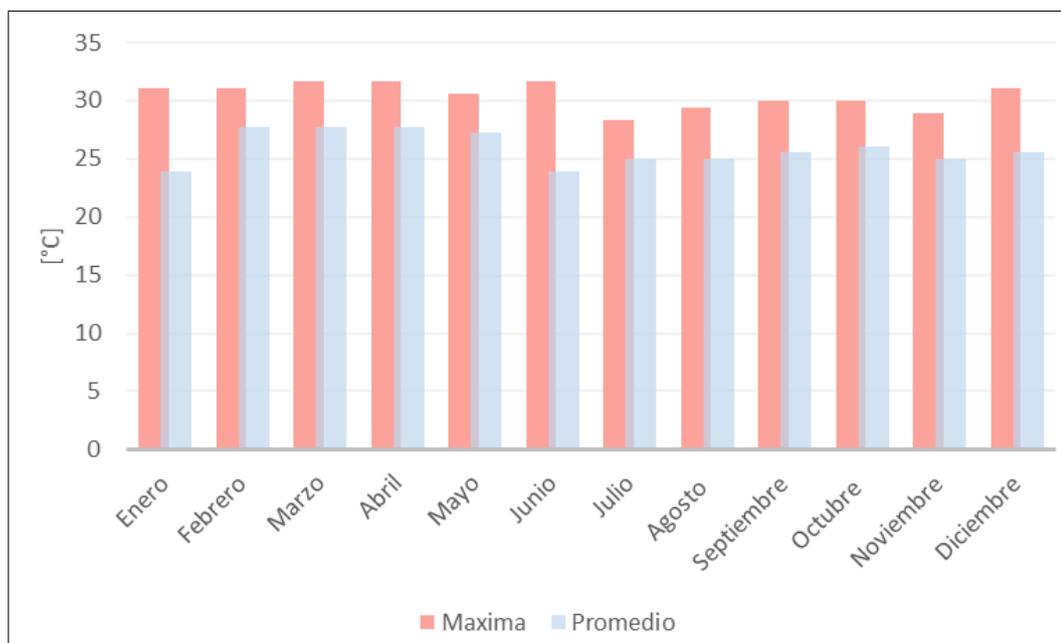


Figura 2.1. Datos de temperatura Guayaquil 2017. (THE WEATHER COMPANY, 2017)

El esquema del procedimiento general seguido se detalla en la figura 2.2, la primera fase del proyecto consistió en realizar un modelado energético, mediante el programa TRNSYS, del edificio de Gobierno Zonal de Guayaquil, en este se considera la envolvente del edificio, las cargas térmicas, características de ocupación y funcionamiento actual de los equipos.

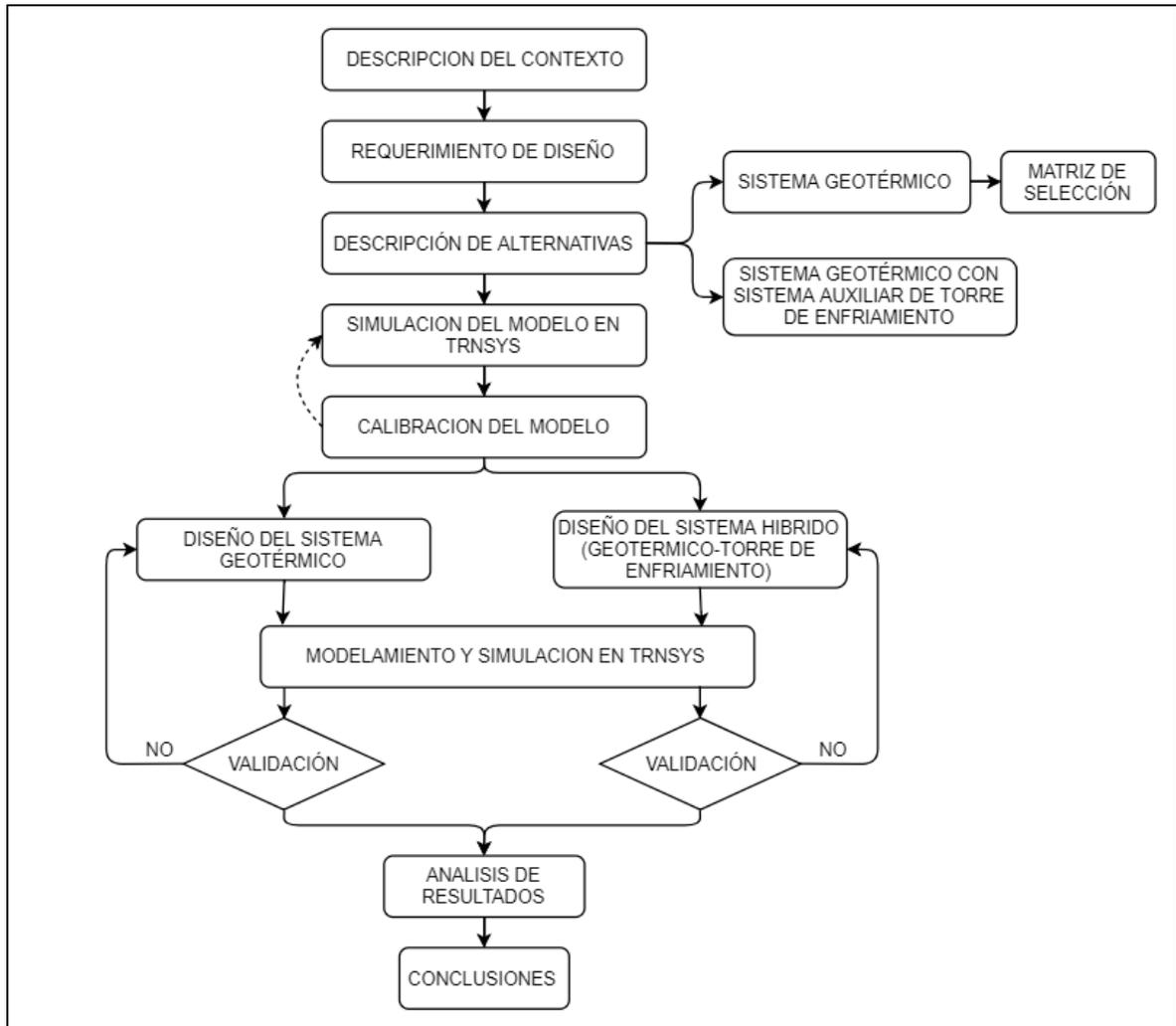


Figura 2.2 Esquema de realización del proyecto.

## 2.1 Caso de estudio: Gobierno Zonal de Guayaquil

El edificio del Gobierno Zonal de Guayaquil, figura 2.3, fue construido a mediados de los años noventa como matriz del banco del progreso. En la actualidad alberga distintas oficinas de agencias del gobierno central, desempeña la función de centro de atención a la ciudadanía para la realización de trámites y la emisión de diferentes documentos. Este edificio se localiza en el norte de Guayaquil en las coordenadas son latitud: 2°09'S y longitud: 79° 53' W.

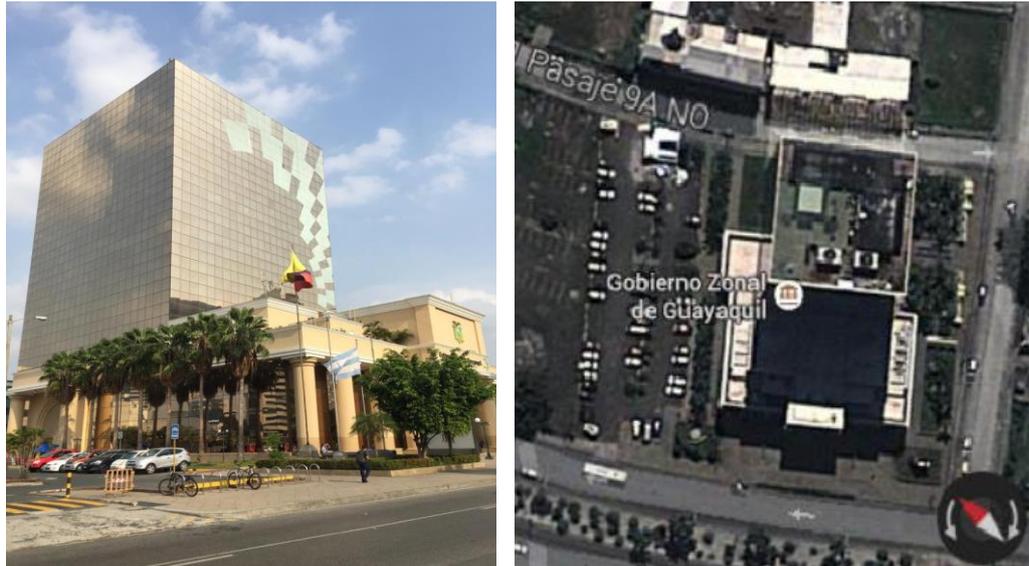


Figura 2.3 Fotografía del edificio (izquierda), imagen satelital (derecha).

En promedio el edificio recibe a cuatro mil personas en un día laboral. Posee quince pisos en los cuales se llevan las actividades de las distintas agencias, un lobby amplio donde funcionan las agencias de trámites y un sótano donde se encuentran parqueaderos y cuarto de máquinas, en la terraza se ubican los Chiller y las torres de enfriamiento, los planos del edificio fueron facilitados por la administración del edificio (APÉNDICE A). El área neta del edificio entre todas las divisiones es de 20,635 m<sup>2</sup>.

### 2.1.1 Sistema de climatización actual

El edificio en la actualidad posee un sistema de climatización con agua helada, este sistema busca distribuir el agua helada a distintas unidades manejadoras de aire con el fin de tener un ambiente entre 22 [°C] y 24 [°C] con una humedad relativa promedio de 50 %. El agua del sistema es enfriada por dos chiller de marca Carrier de 400 y 450 [TON]. Para el bombeo de agua entre las manejadoras y el chiller cuenta con cuatro bombas de 50 HP.

Cada piso posee dos unidades manejadoras de aire, también conocidas como UMA por sus siglas en español, de 180,000 BTU/h, a excepción del piso 15 que cuenta con dos UMA de 36,000 BTU/h, una de 72,000 BTU/h y una de 350,000 BTU/h siendo esta de uso exclusivo para el comedor; el auditorio principal y el lobby cuenta con dos manejadoras de aire de 180,000 BTU/h. Para la remoción de calor en los chillers se usan dos torres de enfriamiento marca Harley, además se cuentan con cuatro bombas de 30 HP para la circulación de agua entre la torre de enfriamiento y el chiller.

**Tabla 2.1 Resumen de equipos de refrigeración.**

<b>Tipo de equipo</b>	<b>Capacidad [TON]</b>	<b>Cantidad</b>
Manejadoras de aire	15	32
	3	2
	6	1
	29	1
Chillers	400	1
	450	1
Torres de enfriamiento	1,000	2

En la tabla 2.1 se muestra en resumen los equipos de climatización que posee donde la capacidad total de las manejadoras de aire es de 521 [TON], mientras que la capacidad total de los chillers es de 900 [TON] y para las torres de enfriamiento es de 2000 [TON]. Para la circulación al edificio se cuenta con cuatro ventiladores centrífugo marca Greenheck que inyectan aire, y cinco extractores de aire marca Greenheck.

### **Equipos auxiliares.**

Para áreas que requieren una demanda mayor de refrigeración se cuenta con equipos de expansión directa para abastecer la demanda. El resumen de estos se encuentra en la tabla 2.2, se asume que el perfil de funcionamiento de estos equipos auxiliares es el mismo que la unidad central.

**Tabla 2.2 Equipos de expansión directa.**

<b>Piso</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Capacidad [BTU/h]</b>	<b>Área</b>
Planta baja	2	30,000	Cuarto de comunicaciones
	2	60,000	Cabinas de atención
3	2	60,000	Sala de lectura
	1	140,000	Coctel Lounge
4	1	60,000	Auditorio
	1	60,000	Hall de Auditorio
8	2	120,000	Centro de datos
10	2	30,000	Cuarto de UPS

Se obtiene que la capacidad total de los equipos auxiliares instalados es de 71 [TON], que correspondería al 13.9% de la capacidad total de las manejadoras de aire.

### **2.1.2 Datos de ocupación del edificio**

En la tabla 2.3 se describe datos promedios de ocupación tomados durante una semana por el personal del edificio.

**Tabla 2.3 Registro de promedio de asistencia.**

<b>Piso</b>	<b>Visitantes</b>	<b>Personal</b>
Planta baja	338	21
Lobby	1099	32
1	217	80
2	227	40
3	148	12
4	120	108
5	333	60
6	41	64
7	134	85
8	110	132
9	26	82
10	33	74
11	480	49
12	67	94
13	18	64
14	25	42
15	14	26

### 2.1.3 Densidad de potencia de equipos

La densidad de potencia consumida se asumió de los valores referenciales provistos por ASHRAE y por el levantamiento de información realizado, estos se encuentran en la tabla 2.4 para los diferentes tipos de espacios que posee el edificio.

**Tabla 2.4 Densidad de equipos.**

<b>Tipo de espacio</b>	<b>[W/m<sup>2</sup>]</b>
Baño	0.75
Corredor	1.72
Cuarto TI	550
Lobby	0.75
Oficinas	7.64
Sala de Juntas	3.98
Cuarto de máquinas	2.91

### 2.1.4 Densidad iluminación

La densidad lumínica se asumió consistente con los valores propuestos en el ASHRAE 90.1, estos se encuentran tabulados en la tabla 2.5 donde se encuentra por tipo de espacio.

**Tabla 2.5 Densidad de iluminación.**

<b>Tipo de espacio</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
Oficina	11.84
Baño	9.69
Sala de juntas	14
No Acond	6.46
Comedor	15.5
Auditorio	14
Atreo auditorio	8.7
Pasillo	5.38
Escaleras	6.46
Cuarto eléctrico	16.15

## **2.2 Descripción del problema**

El organismo INMOBILIAR reportó en el 2012 un consumo energético de \$311,222.50, en edificaciones de carácter comercial entre el 50-65% del uso energético se utiliza en el sistema de climatización de aire (Johansson, Patwardhan, Nakićenović, Gomez-Echeverri, & International Institute for Applied Systems Analysis, 2012). Se estima que de este consumo entre el 3-9% de esta energía se usa para mantener operativo las torres de enfriamiento.

## **2.3 Requerimientos diseño**

Primordialmente el nuevo sistema debe abastecer la demanda de rechazo del calor del sistema implementado en el edificio actualmente, también se consideran los siguientes puntos como necesarios para el diseño.

### **2.3.1 Económico**

Debe presentar un ahorro en consumo energético de al menos 10% respecto al sistema actual.

El consumo del recurso hídrico del sistema de rechazo de calor debe minimizarse en un 50%.

Los costos de mantenimiento deben disminuirse.

### **2.3.2 Técnico**

La eficiencia del sistema debe mantenerse o mejorarse.

Se debe trabajar con las capacidades actuales de los chillers.

La instalación del sistema debe ser factible con la tecnología que posee el Ecuador actualmente.

## **2.4 Descripción Alternativas**

Para poder cumplir con los objetivos, se plantea utilizar un sistema que sea factible en cuanto a la disminución del consumo de energía eléctrica y mantener un ambiente de confort en la edificación.

### 2.4.1 Alternativa 1: Sistema Geotérmico (GSHP)

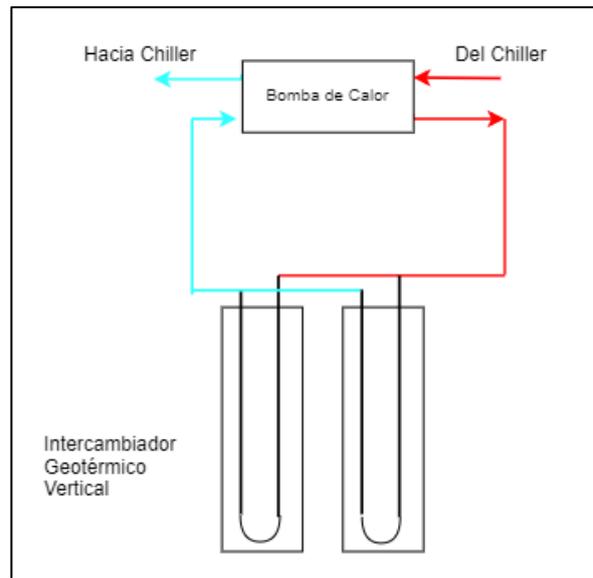


Figura 2.4 Esquema de un sistema geotérmico vertical.

La configuración del sistema geotérmico habitual consta de una serie de tuberías enterradas que hacen de intercambiador de calor con el suelo, donde la disposición de ellos puede ser vertical como se observa en la figura 2.4, horizontal o en espiral. El fin de estos intercambiadores será transferir el calor del condensador del chiller hacia el suelo. El fluido que circula por este intercambiador suele ser agua, mezclas de agua con alcohol o una mezcla con líquido anticongelante; se usará el agua como fluido en este proyecto.

El intercambiador geotérmico GHX, por sus siglas en inglés, de tipo vertical cuenta con tuberías de polietileno de alta densidad con terminación en U. Los cuales se insertan en pozos verticales con profundidades dentro de 45 a 150 m. Esta profundidad se puede ver afectada dependiendo del terreno a trabajar, pero al contrario requiere menor área de suelo. Al tener perforaciones profundas se logra tener un mayor contacto con el suelo, el cual presenta pequeñas variaciones de temperatura y requiere menor cantidad de tubería a emplear. Por lo que presenta elevada eficiencia general en comparación a los otros tipos de instalación. La principal desventaja es su elevada inversión inicial.

El GHX horizontal utiliza una mayor área superficial para su implementación, pero requiere una menor profundidad para instalar, esta suele ser entre 1 a 3 m. Además, por sus características térmicas utiliza una mayor longitud de tubería. El costo de instalación es menor debido que su aplicación es más frecuente y requiere menos trabajo para instalar.

Mientras que el tipo “Slinky” es una variación del tipo horizontal, este logra cubrir con menor área de trabajo una carga mayor o igual que la del GHX horizontal debido a que su tubería es de forma espiral y su colocación es en forma de resorte en la tierra.

#### ***2.4.1.1 Selección del Tipo de Instalación de Sistema Geotérmico***

Para elaborar la simulación se debe definir qué tipo de sistema geotérmico se utilizará, por lo cual se aplicará una matriz de selección en la cual se buscará posicionar la mejor alternativa entre los diferentes sistemas actuales con el cual trabajar en este proyecto. Para esto se dispondrá de una serie de criterios que se basarán entre restricciones por la edificación y requisitos por el usuario.

El diseño del sistema geotérmico deberá cumplir ciertos requisitos como:

- Reducción del consumo energético en la edificación
- Contar únicamente con el espacio actual de la edificación.

#### **Criterios de Selección**

Se plantea los siguientes criterios basándose en la ubicación actual de la edificación y los requerimientos de diseño planteados anteriormente:

**Costo de Instalación.** - Se busca un diseño con el cual se pueda reemplazar los sistemas tradicionales de aire acondicionado para

edificaciones. Actualmente esta tecnología es más costosa que las demás, pero más eficientes y amigables con el ambiente.

**Factibilidad de Instalación.** - El sistema debe instalarse con el mínimo requerimiento de espacio o dentro del propio terreno del edificio.

**Eficiencia Energética.** - El sistema debe ser capaz de reducir considerablemente el consumo de energía eléctrica empleada tradicionalmente por los sistemas de aire acondicionados. Además de cubrir las cargas térmicas de la edificación.

### **Ponderación de Criterios**

Esta se basó en la relevancia que tienen los criterios anteriormente descritos para la elaboración del proyecto, otorgándole una ponderación mayor o menor dependiendo del nivel de restricción del criterio.

**Tabla 2.6 Ponderación de los criterios de selección.**

Matriz de ponderación	Ponderación (%)
Costo de Instalación	42%
Eficiencia Energética	36%
Factibilidad de Instalación	22%
Total	100%

Los valores tabulados en la tabla 2.6 se detalla la ponderación de los criterios, siendo el costo de instalación la ponderación más alta debida que se analizará la viabilidad del sistema. Este será el aspecto más importante al momento de seleccionar el sistema geotérmico.

### **Matriz de Selección**

Una vez definidas las ponderaciones para cada criterio, se le otorga dentro de esta matriz una calificación dentro del 1 al 10. Siendo 10 la

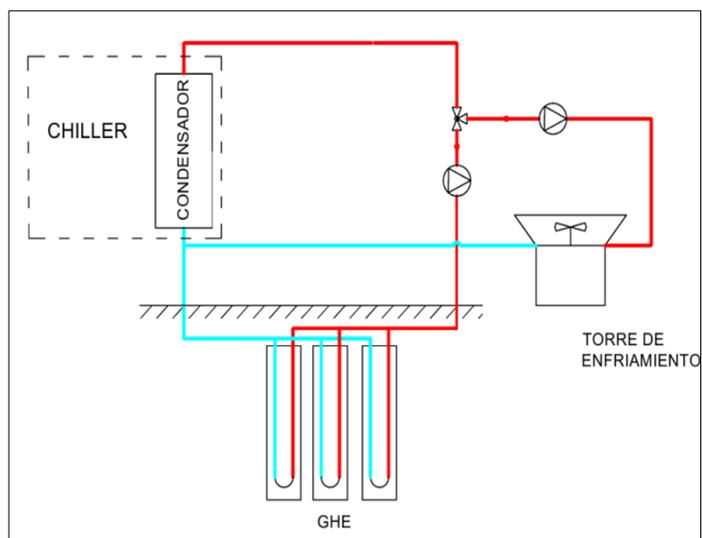
máxima calificación en cuyo caso la alternativa cumpla con dicho requisito y 1 la calificación que no cumpla con el mismo.

**Tabla 2.7 Selección de Mejor Alternativa.**

Criterio de Selección		Tipos de Sistemas Geotérmicos					
		Vertical		Horizontal		Slinky	
		Nota	Puntaje	Nota	Puntaje	Nota	Puntaje
Costo de Instalación	42%	4	1.68	8	3.36	8	3.36
Eficiencia Energética	36%	10	3.6	4	1.44	6	2.16
Factibilidad de Instalación	22%	8	1.76	8	1.76	6	1.32
Total			<b>7.04</b>		6.56		6.84

La tabla 2.7 muestra las puntuaciones otorgadas para los diferentes tipos de intercambiadores del sistema geotérmico se obtuvo que el de tipo vertical presenta la mayor puntuación por lo que se trabajara con esta configuración para el proyecto.

#### 2.4.2 Alternativa 2: Sistema híbrido geotérmico con torre de enfriamiento (HGSHPs)



**Figura 2.5 Esquema de un HGSHP.**

Este sistema busca la disipación principal de calor usando un circuito de rechazo geotérmico, como el descrito en la alternativa anterior, y una sección auxiliar para la disipación usando torre de enfriamiento como se visualiza en la Figura 2.5. Esta alternativa surge ante los elevados costos iniciales de GSHP que no se ven devengados a corto plazo, y que mediante el sistema auxiliar se busca disminuir los costos de instalación al reducir el tamaño del sistema de GSHP teniendo a la par una eficiencia mayor que los sistemas convencionales.

Siguiendo el esquema de la figura 2.2 estos sistemas trabajaran de forma paralela con lo que se buscará que la torre de enfriamiento cubra entre el 33%, 50% y 67% de la carga total de la edificación, mientras que el GSHP cubra la respectiva diferencia.

## **2.5 Modelo energético del edificio**

### **2.5.1 Desarrollo del modelo geométrico**

Para realizar el modelado 3D del edificio se usa el plug-in TRNSYS 3D en el software Sketchup, para esto se debe de conocer de antemano en cuantas zonas térmicas se dividirá el edificio, una zona térmica se define como un espacio que posee las mismas condiciones de temperatura del aire y cargas internas (Hensen & Lamberts, 2011).

Cada piso se definió con cinco zonas térmicas como se puede observar en la figura 2.6, esto se realiza para tomar en cuenta los efectos de la radiación solar sobre las diferentes superficies, el modelamiento de la zona central se realizó usando de referencia los planos del edificio que se localizan en el APÉNDICE A, detalle sobre la construcción del modelo se localiza en el APÉNDICE B.

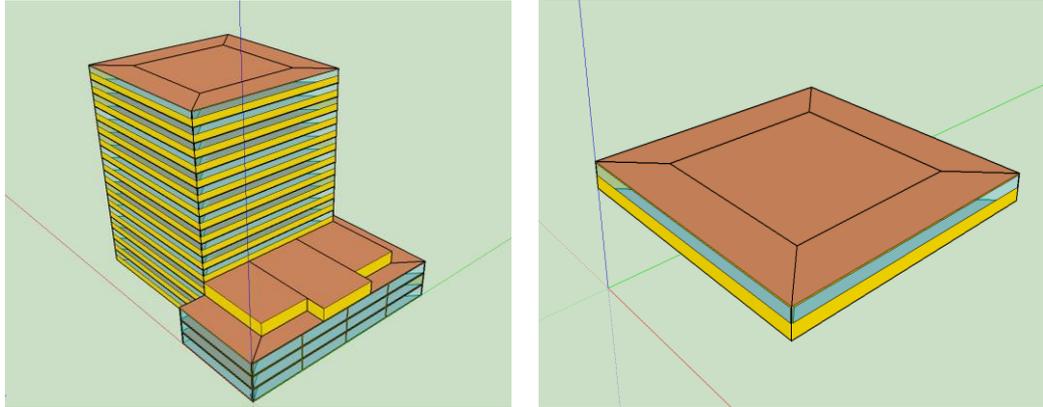


Figura 2.6 Modelo Sketch-up (Derecha), zonas térmicas (izquierda).

## 2.5.2 Cargas internas del modelo

### Ocupancia

Para determinar la carga latente y sensible que se produce por la actividad humana se considerara los valores previamente tabulados en la Tabla 2.3 y se determina mediante una relación de áreas la cantidad de personas por área que ocupan aquella zona, el detalle del cálculo se puede apreciar en el APÉNDICE B.

### Iluminación

Para la ganancia por iluminación se asumirá que será igual a la densidad lumínica por el área, donde se estima que el 80% de esta ganancia es por efecto de radiación y el 20% es por efecto convectivo. El detalle del cálculo se aprecia en el APÉNDICE B.

### Equipos

Para estimar la ganancia debido a la densidad de equipos en la zona térmica se asumirá que la mitad que es igual a la densidad de equipos, Tabla 2.4, multiplicado por una relación de áreas, donde el 50% de esta ganancia es por efectos de radiación y el resto es por efectos convectivos. El procedimiento respectivo se encuentra en el APÉNDICE B.

### 2.5.3 Estimación del coeficiente convectivo externo

Para la estimación del calor transmitido por convección entre las paredes externas y el medio, se estimará el coeficiente convectivo usando la aproximación de McAdams el cual relaciona el coeficiente convectivo con la velocidad del viento.

$$h_{ext} = 3.8V_{wind} + 7.4 \quad (2.1)$$

Dónde:

$H_{ext}$ : Es el coeficiente de convección [ $W/m^2 K$ ]

$V_{wind}$ : Es la velocidad del viento [ $m/s$ ]

## 2.6 Modelo TRNSYS

Para realizar el modelo de la línea base se procedió detallar las características geométricas del edificio en TRNSYS, las cargas externas por medio de los perfiles detallados en el APÉNDICE B, además se procedió a modelar las manejadoras de aire de los diferentes pisos y colocar un control de temperatura a cada piso. El circuito de agua helada posterior fue unido a la sección de chiller y torre de enfriamiento. Para la definición de cada componente configuro de acuerdo con el catálogo correspondiente. El detalle de esto se encuentra en el APÉNDICE B.

### 2.6.1 Calibración del modelo energético

Para la calibración de la línea base del edificio, se procederá a realizar los lineamientos dispuestos en el ASHRAE 14, en la cual se acepta el modelo si los índices de coeficientes de variación del error cuadrático medio (CVRMSE) y el error de sesgo normalizado (NMBE) no sobrepasan los límites que se observa en la tabla 2.8. Siendo estos tabulados mediante una comparación mensual entre los consumos energéticos.

Tabla 2.8 Tolerancias para la calibración del modelo.

Índice	Rango de aceptación
NMBE	±5 %
CVRMSE	±15%

## 2.7 Diseño de sistema geotérmico

Para el diseño del intercambiador de carga completa se siguió los lineamientos expuestos en el “Manual técnico del uso del terreno en aplicaciones de geotermia de baja temperatura” (INER, 2015) y recomendaciones del libro “Geothermal Heating and Cooling”. (Kavanaugh & Rafferty, 2014)

El dimensionamiento del GHX se lo elaboró para un tercio de la carga y a media carga. Esto se lo realizó para obtener una matriz base de agujeros para los demás porcentajes de carga, facilitando de esta forma los cálculos.

### 2.7.1 Parámetros considerados

Previo al dimensionamiento del GHX se deben tomar en consideración los siguientes parámetros. La carga de enfriamiento ( $TC$ ) requerido por la edificación, la cual se la determinó por medio de simulación con el software Trnsys, en  $\frac{Btu}{h}$ .

La temperatura de ingreso a la bomba de calor ( $EWT$ ) y de salida ( $LWT$ ); las cuales se las considero dependiendo la temperatura, en  $^{\circ}F$ , del suelo de la ciudad de Guayaquil. Los valores de estos parámetros se pueden observar en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Parámetros de ingreso para el GSHP.

TC	175	TRF	2.10E+06	Btu/hr
EWT	35	$^{\circ}C$	95	$^{\circ}F$
LWT	45	$^{\circ}C$	113	$^{\circ}F$

La tubería utilizada en GSHP son de polietileno de alta densidad (HDPE) DR 11 con un diámetro nominal (DN) 1  $\frac{1}{4}$  in, cuyas características y propiedades se presentan en la tabla 2.10.

**Tabla 2.10 Características y propiedades térmicas de tubería HDPE.**

Diámetro Nominal (DN)	1.25	in	31.75	mm
Diámetro Interno (DI)	1.36	in	34.544	mm
Diámetro Externo (DO)	1.66	in	42.164	mm
Conductividad	0.43	(W/m K)	0.25	(Btu/hr ft F)
Rugosidad	0.000005	ft	0.001524	mm

El dimensionamiento de estas tuberías se las definió siguiendo la recomendación del libro el cual indica que para profundidades de hasta 500 ft (150 m) la dimensión es de 1 ¼ in.

La rugosidad ( $\epsilon$ ) fue determinada por el catálogo de la compañía (TIGRE, 2011), mientras que para la conductividad térmica se tomó referencia las del libro de Kavanaugh y Rafferty, 2014. Las propiedades térmicas del suelo de Guayaquil, tabla 2.11, fueron reportadas en la investigación de Soriano, 2017.

**Tabla 2.11 Propiedades térmicas del suelo de Guayaquil.**

	SI	PI
Difusividad	0.378 (m <sup>2</sup> /día)	4.069 (ft <sup>2</sup> /día)
Conductividad	1.668 (W/m K)	0.964(Btu/h ft F)
Temperatura del suelo	26.5 °C	79.7 °F

## **2.7.2 Dimensionamiento del GSHP**

Para determinar la longitud total del agujero para enfriamiento se utilizó la ecuación 2.2, esta ecuación relaciona la carga térmica con las resistencias del agujero y del suelo con respecto a la diferencia de temperatura que se desea obtener en el fluido.

$$L_c = \frac{TC * \left( \frac{EER + 3.412}{EER} \right) * (R_b + R_g * F_c)}{\frac{EWT + LWT}{2} - T_g} * BM \quad (2.2)$$

Siendo:

$TC$ : Es la carga de refrigeración,  $\frac{Btu}{h}$

$EER$ : Es el rendimiento térmico de la bomba de calor,  $\frac{Btu}{h * W}$

$R_b$ : Es la suma de las resistencias de tubería ( $R_{pp}$ ) y del relleno ( $R_{grt}$ ),  
 $\frac{h * ft * ^\circ F}{Btu} \left( \frac{m * K}{W} \right)$

$R_g$ : Es la resistencia térmica del suelo,  $\frac{h * ft * ^\circ F}{Btu} \left( \frac{m * K}{W} \right)$

$F_c$ : Es la fracción de uso en modo frío (en este caso toma el valor de 1)

$BM$ : Es un factor de corrección por el calentamiento del terreno.

La cantidad de agujeros ( $NB$ ) depende de la profundidad ( $H$ ) por agujero, como se observa en 2.3.

$$NB = \frac{L_c}{H} \quad (2.3)$$

Para este trabajo se consideró una profundidad máxima de 320 ft (100 m). El detalle del cálculo se puede apreciar en el APÉNDICES D.

### 2.7.3 Rechazo de calor y flujo de agua

El rechazo de calor ( $HR$ ) es la carga térmica a disipar por el condensador de la bomba de calor y se lo determinó usando la ecuación 2.4

$$HR = TC * \left( \frac{EER + 3.412}{EER} \right) = 2.10 * 10^6 * \frac{12.62 + 3.412}{12.62} = 2.68 * 10^6 \left( \frac{Btu}{hr} \right) \quad (2.4)$$

Al conocer la diferencia de temperatura a la cual se desea trabajar, el flujo de agua se calculó por medio de la ecuación 2.5. Donde  $Q$  es el flujo de agua.

$$Q = \frac{HR}{500 * (LWT - EWT)} = \frac{2.68 * 10^6}{500 * 10} = 300 \text{ (gpm)} \quad (2.5)$$

#### 2.7.4 Resistencia térmica del suelo

La resistencia térmica del suelo ( $R_g$ ) se calcula por medio de la relación entre diámetros del terreno afectado y de perforación con respecto a la conductividad del suelo, siguiendo la ecuación de resistencia térmica para conducción radial en cilindros.

$$R_g = \frac{\ln\left(\frac{D_{go}}{D_b}\right)}{2*\pi*k_g} = \frac{\ln\left(\frac{15}{5}\right)}{2*\pi*0.964} = 0.59 \frac{h\ ft\ ^\circ F}{Btu} \quad (2.6)$$

Dónde:

$k_g$ : Es la conductividad del suelo de Guayaquil,  $\frac{Btu}{h\ ft\ ^\circ F}$   $\left(\frac{W}{m\ K}\right)$

$D_b$ : Es el diámetro de la perforación del suelo,  $ft$  ( $m$ )

$D_{go}$ : Diámetro del terreno afectado por la transferencia de calor, tiene un valor de 15 ft (4.5 m)

Se consideró un diámetro de perforación de cinco pulgadas que es el recomendado para este tipo de instalaciones.

#### 2.7.5 Resistencia de la tubería

Para la resistencia de la tubería se utiliza la ecuación 2.6, variando los parámetros respectivos con los valores previamente tabulados en la tabla 2.10 y utilizando la conductividad de la tubería de HDPE. Al ser tubo en U, la resistencia se multiplica por dos.

$$R_{pp} = 2 * \frac{\ln\left(\frac{1.66}{1.36}\right)}{2 * \pi * 0.249} = 0.26 \frac{h\ ft\ ^\circ F}{Btu}$$

#### 2.7.6 Resistencia de Relleno

El relleno se consideró siguiendo las proporciones indicadas por (Allan & Philippacopoulos, 1999), que se observan en la tabla 2.12 la cual tiene

una conductividad térmica de  $k_{grt} = 1.4 \frac{Btu}{h\ ^\circ F\ ft}$ .

**Tabla 2.12 Proporciones de materiales para relleno.**

Cemento (Kg/m3)	587.7
Arena (Kg/m3)	1251.8
Bentonita (Kg/m3)	6.5
Plastificante (l/m3)	8.8
Agua (l/m3)	323.3

Para obtener la resistencia del relleno, se utilizó la ecuación 2.7 indicada en el manual del INER.

$$R_{grt} = \frac{2}{k_{grt} * \left( 17.44 * \left( \frac{D_b}{D_O} \right)^{-0.6052} + 21.91 * \left( \frac{D_b}{D_O} \right)^{-0.3796} \right)} \quad (2.7)$$

$$R_{grt} = 0.061 \frac{h \text{ ft } ^\circ F}{Btu}$$

### 2.7.7 Factor de corrección **BM**

La carga neta energética del suelo normalizada, NNAGL por sus siglas en inglés, es un factor de corrección que permite considerar el calentamiento del terreno por la transferencia de calor hacia este de forma continua. (INER, 2015)

$$NNAGL = \frac{AGL_{DC} - AGL_{DH}}{LC * \left( \frac{EWT - LWT}{2} - T_g \right)} \quad (2.8)$$

Siendo:

$AGL_{DC}$ : Es la energía anual para enfriamiento en  $Btu$  ( $kWh$ ).

$AGL_{DH}$ : Es la energía anual para calentamiento  $Btu$  ( $kWh$ ).

$LC$ : Es el valor sin multiplicar de  $L_c$  por  $BM$  en  $ft$  ( $m$ )

Con este valor, se determinó el  $BM$ , por medio de interpolación de las gráficas adjuntas en APÉNDICE D.

### 2.7.8 Selección de bomba para recirculación

Para seleccionar la bomba fue necesario conocer la pérdida de carga ( $h_l$ ), la cual se determinó utilizando la ecuación 2.9 de Darcy-Weisbachel.

$$h_l = f \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.9)$$

Donde el factor de fricción se determinó por medio de la ecuación 2.10 denominada ecuación de Churchill.

$$f = 8 * \left[ \left( \frac{8}{Re_D} \right)^{12} + \left( \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right) \right]^{\frac{1}{12}} \quad (2.10)$$

Dónde:

$$A = \left[ 2.457 * \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re_D} \right)^{0.9} + 0.27 * \left( \frac{e}{D} \right)} \right) \right]^{16}$$

$$B = \left( \frac{37530}{Re_D} \right)^{16}$$

La determinación del número de Reynolds, ecuación 2.11, se basó para cada diámetro de tubería por el cual trabaja el fluido.

$$Re_D = \frac{4 * Q}{\pi * D * v} \quad (2.11)$$

Dónde:

$Q$  : Caudal en la tubería.  $\left( \frac{ft^3}{s} \right)$

$D$  : Es el diámetro interior de la tubería.  $(ft)$

$v$  : Es la viscosidad cinemática.  $\frac{ft^2}{s}$

Para las cargas menores ( $h_m$ ), referente a los accesorios se utilizó la ecuación 2.12

$$h_m = \frac{K_L V^2}{2g} \quad (2.12)$$

Conocida las pérdidas en la tubería, y el caudal que circula en la tubería, se realizó interpolaciones de valores de pérdidas del sistema para otros caudales por medio de la relación 2.13. (Kavanaugh & Rafferty, 2014)

$$H_2 = H_1 * \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right) \quad (2.13)$$

De esta forma se obtiene el punto de operación que se interseca al conocer la curva de la bomba del fabricante. A demás se debe calcular el NPSH disponible y compararlo con el requerido por la bomba.

Mayor detalle del cálculo realizado se encuentra en el APÉNDICE D.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Calibración de modelo

La calibración del modelo energético del edificio se realizó mediante una comparación mensual del consumo eléctrico reportado por el edificio con los resultados obtenidos en la simulación como se puede observar en la figura 3.1, en estos se observa que el modelo reporta valores similares a los reportados en la simulación del edificio.

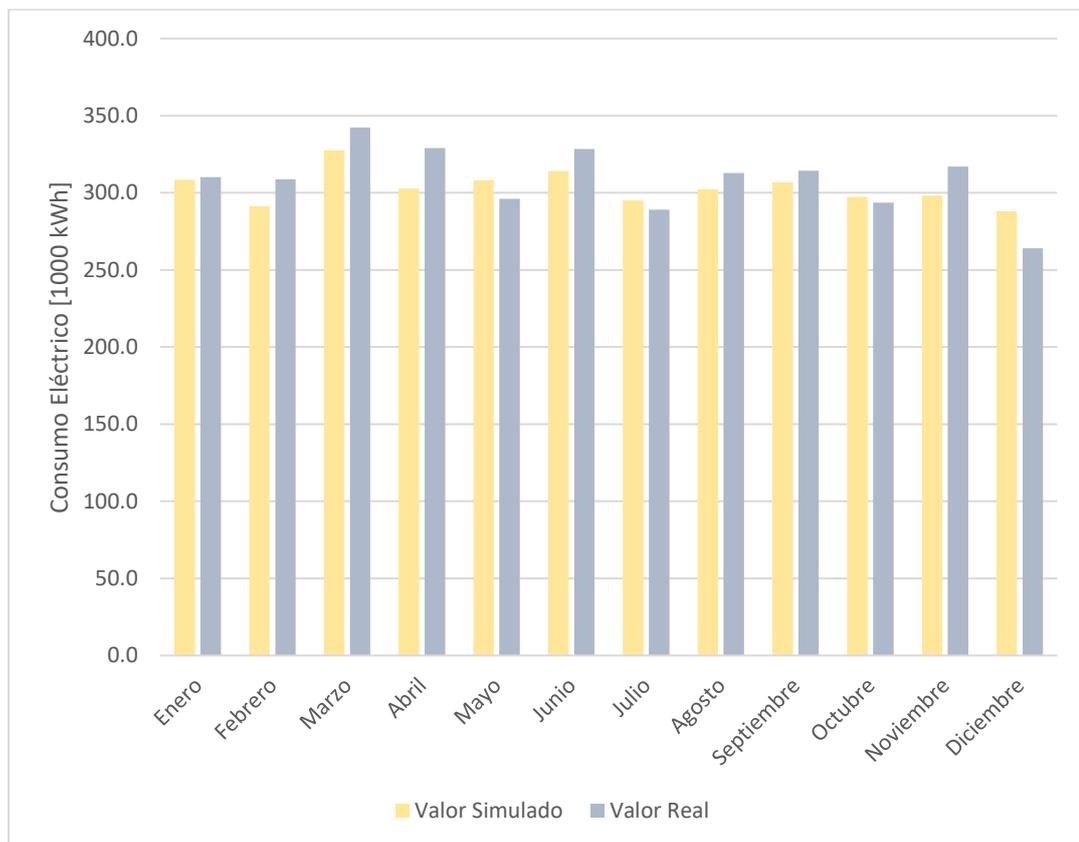


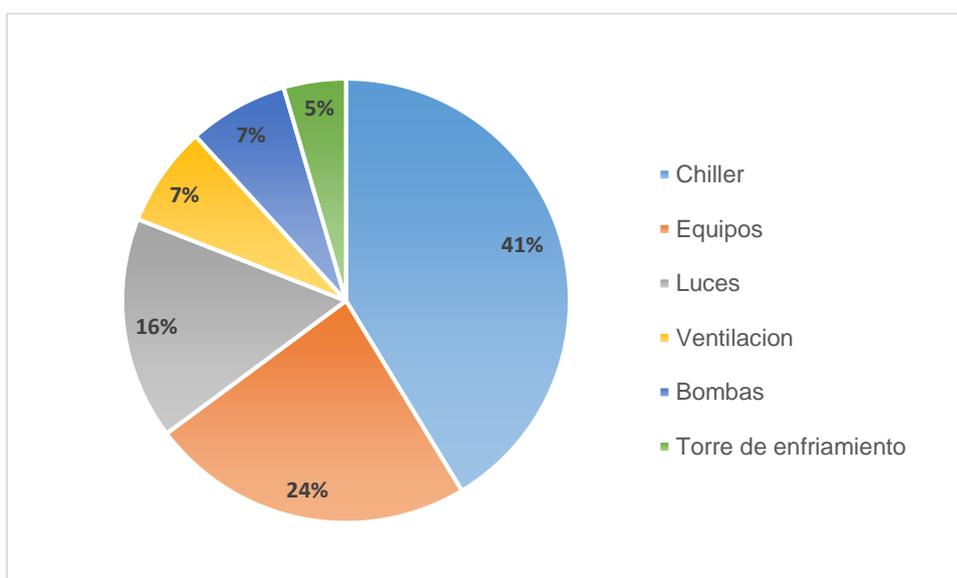
Figura 3.1 Consumo energético.

Para la validación de la calibración del modelo se determinaron el coeficiente de error cuadrático (CVRMSE) y el error de sesgo normalizado (NMBE), los que se encuentran tabulados en la tabla 3.1. Dado que los parámetros de validación se encuentran dentro de la tolerancia, el modelo es válido.

**Tabla 3.1 Índices para validación del modelo.**

Índice	Valor obtenido	Rango de aceptación
NMBE	-4%	±5 %
CVRMSE	6%	±15%

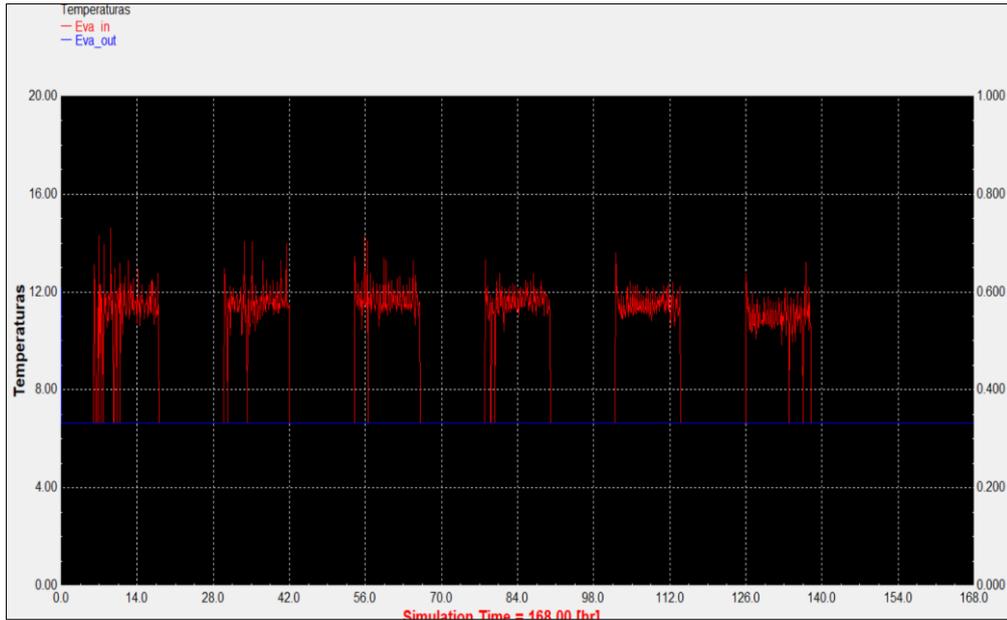
El consumo energético simulados de los diferentes equipos del edificio se encuentran en el APÉNDICE C, en la figura 3.2 en la cual se observa un promedio del porcentaje de consumo respecto a los diferentes equipos, estos valores están conformes con los reportado por la literatura (Johansson et al., 2012), el mayor consumo tiene el sistema de enfriamiento de agua requiriendo en promedio el 40% de la energía total del edificio para su operación.



**Figura 3.2 Porcentaje de consumo por equipos.**

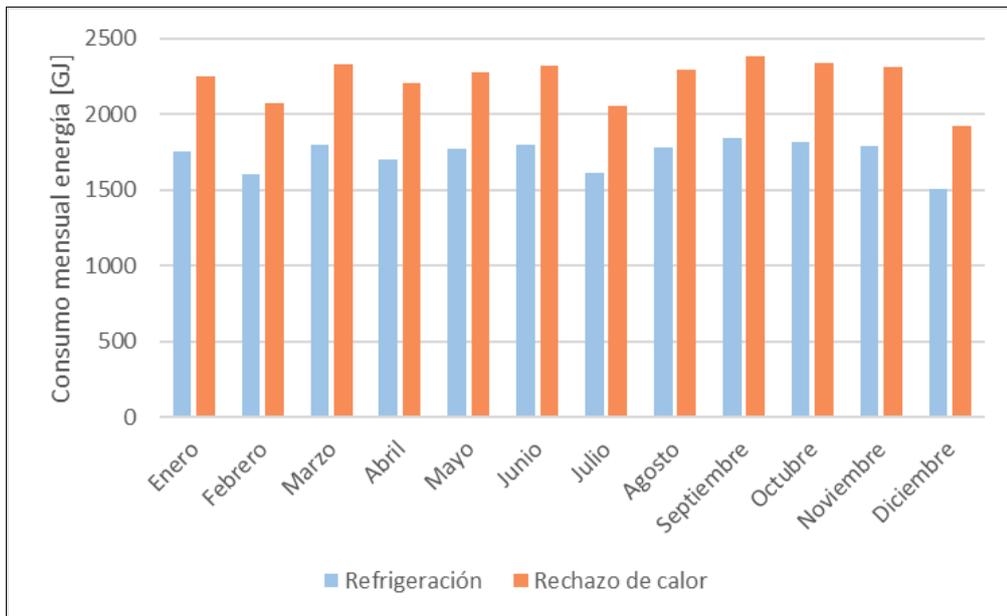
### **3.1.1 Perfil de uso el chiller**

Mediante la calibración del modelo se estableció las condiciones de operación de los chillers, en la figura 3.3 se observa las condiciones de temperatura de entrada y salida en el evaporador para el periodo de una semana de operación. Se puede observar que la temperatura de retorno del sistema de planta de agua helada no en promedio ronda los 12 °C mientras que el ultimo día no se censa debido a que la planta de agua helada no se encuentra en operación.



**Figura 3.3** Temperatura de entrada y salida en el evaporador.

Datos de entrada de calor y rechazo de calor se encuentran tabulados mensualmente en la figura 3.4, se puede observar que no existe una variación significativa entre meses lo que se espera de una región ubicada en una zona cálida como es Guayaquil. La carga de enfriamiento de diseño es de 525 TON.



**Figura 3.4** Datos de energía en el chiller.

### 3.2 Sistema Geotérmico

Se dimensionó el intercambiador geotérmico vertical siguiendo la metodología en el capítulo 2 incluyendo el cálculo de las pérdidas de cabezal para cada porcentaje de las cargas a analizar en el capítulo 1.

#### 3.2.1 Intercambiador enterrado

Para la edificación del Gobierno del Litoral se realizó el diseño del sistema geotérmico dividiendo la carga de enfriamiento (515 TON) para 3. Esto permitió obtener simultáneamente los diseños para los porcentajes de carga de 33%, 66% y 100% debido que el dimensionamiento para cada sistema será proporcional a la carga. Como se lo consideró en el estudio de implementación de un sistema geotérmico en la Universidad de Tennessee (Birchfield, Kester, & Cho, 2014).

Para el diseño de carga al 50% se consideró la mitad de la carga de enfriamiento, cuyo dimensionamiento se observa en la tabla 3.2 junto con el de los demás porcentajes.

Tabla 3.2 Dimensionamiento de sistemas geotérmicos.

Porcentaje de Carga (%)	Longitud intercambiador (ft)	No de agujeros	Profundidad (ft)	Flujo de agua (GPM)
100	317550	996	320	891
67	211700	664	320	594
50	158780	496	320	445
33	105850	332	320	297

El circuito de agujeros está conformado por una matriz de 21 filas con 16 agujeros cada una con una separación de 6m (20ft) entre ellos.

Esto permite indicar que para una carga completa se requerirá, 3 matrices de (21x16), para carga del 67% serán 2 matrices y para 33% una sola matriz. Para la carga a 50%, la matriz del circuito fue de 31 filas con 16 agujeros.

Mantener una menor cantidad de agujeros en cada fila, que tener la misma cantidad de agujero que filas, permitió mantener una pérdida de cabezal menor en la distribución de tuberías.

Se puede observar que el flujo de agua es proporcional a la carga a enfriar, debido que el flujo del agua será el encargado de disipar el calor de los chillers como se relaciona en la ecuación 2.5.

### 3.2.2 Sistema de bombeo

El sistema de bombeo se lo determinó al calcular las pérdidas de cabezal en las tuberías, que dependieron únicamente por pérdidas de fricción y de accesorios utilizados, sobreestimando un 20% de pérdidas por accesorios no contemplados. Se obtuvo el sistema de bombeo para la matriz, a 33% y 50% de la carga, debido que son las principales para el diseño general y sus puntos de diseño se observan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Parámetros de diseño de bombas de circuitos.

Porcentaje de Carga (%)	Flujo de agua (GPM)	Perdidas de cabezal (ft)
50	445	37
33	297	36

Es habitual que para este tipo de sistemas se utilicen 2 bombas en paralelo y una de back-up. De esta forma se evitan paras prolongadas y permite un mejor mantenimiento de estas.

Las bombas utilizadas son de uso comercial en el territorio ecuatoriano, fabricadas por Goulds Water Technology y distribuido por la empresa “La llave”.

#### Carga de 33%

Se emplearon dos bombas centrifugas en paralelo modelo 21F de 2 ½ x 3-9, donde la curva del fabricante se observa en los APÉNDICES.

La potencia nominal de esta bomba es de 5 HP.

El punto de operación del sistema en paralelo es de 364 GPM y vence una carga hasta de 54 ft.

La eficiencia de la bomba es de 0.65.

La potencia de bombeo y eficiencia mecánica del sistema se observa en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Potencias de operación a 33% de carga.**

Pot. Bombeo (HP)	7.6
Pot. Mecánica (HP)	10.0
Eficiencia Mecánica	0.76

### **Carga de 50%**

Se utilizó 3 bombas del mismo modelo que la carga a 33%.

El punto de operación del sistema en paralelo es de 468 GPM y vence una carga hasta de 41 ft.

La eficiencia de la bomba es de 0.50

La potencia de bombeo y eficiencia mecánica del sistema se observa en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Potencia de operación a 50% de carga.**

Pot. Bombeo (HP)	9.7
Pot. Mecánica (HP)	10.0
Eficiencia Mecánica	0.97

La eficiencia mecánica de ambas bombas se encuentra dentro del rango aceptable para el funcionamiento de una bomba centrífuga, de 50%-85%, el cual nos indica una selección aceptable para la recirculación de agua (Barra, 2013).

### **3.2.3 Inversión**

Conocer el valor de inversión de los sistemas geotérmicos es de suma importancia a la hora de decidir su implementación dentro del marco de en cuanto al tiempo de amortización, es por esto que se calcularon costos que son directos para la implementación de estos sistemas.

Se consultó trabajos realizados y cotizaciones de equipos y materiales en el mercado local para tener un valor real para implementar estos sistemas.

**Tabla 3.6 Costos de tubería y accesorios.**

Costo de tuberías y accesorios			
	Costo Unitario (\$)	Unidades	Costo Total (\$)
Manguera PE 2'' (4m)	25.85	2304	\$59,565.84
Manguera PE 1 1/4'' (4m)	10.64	16540	\$175,983.37
Codo 90	5.34	42	\$7,625.52
Tee	9.13	1428	\$13,037.64
Total			\$256,212.38

En la tabla 3.6 se visualiza el precio del mercado, para tuberías y accesorios de HDPE, cotizados en la empresa "Termocruz".

Los precios en el mercado de estos materiales para el relleno vienen dados para sacos de un peso definido. El costo por cada material se visualiza en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7 Costos de materiales de relleno.**

Material	Precio Unitario (\$)	Unidades	Costo Total (\$)
Cemento (50Kg)	8.06	4204	\$33,880.54
Arena (50 Kg)	0.93	8954	\$8,326.79
Bentonita (22.6 Kg)	21.00	1064	\$22,341.11
Plastificante (10Kg)	20.08	323	\$6,493.13
Agua (1 m3)	0.74	116	\$85.82
Total			\$71,127.39

Para la estimación del costo de instalación y maquinaria se consultó el trabajo realizado de un sistema geotérmico en la Base Naval Sur el cual tuvo un costo de \$120 por metro.

En base a esto se obtuvo el costo para la elaboración de una sola matriz de agujeros (carga al 33%), incluyendo el costo de mano de obra mensual estimando que la duración de la instalación de una sola matriz de 336 agujeros es de 6 meses.

**Tabla 3.8 Costos de maquinaria, perforación y mano de obra.**

Descripción	Precio Unitario (\$)	Unidades	Costo Total (\$)
Perforación y relleno	12000	331	\$3,969,549.78
Máquina de electro-fusión	650	3	\$1,950.00
Mano de Obra	2100	8	\$16,800.00
Ingeniero de Obra	12000	2	\$24,000.00
Bomba de agua	2500	3	\$7,500.00
Total			\$4,019,799.78

En base a la tabla 3.8 se observa que el costo predominante para estas instalaciones es el costo de la perforación, siendo este muy elevado con respecto al costo de perforación en otros países que con mayor frecuencia implementan estos sistemas, siendo ese costo entre \$20 a \$40 por metro.

El costo a invertir para una matriz de 336 agujeros para la ciudad en Guayaquil para 33% de la carga se visualiza en la tabla 3.9.

**Tabla 3.9 Inversión sistema geotérmico en Guayaquil.**

Inversión	
Costo de tuberías y accesorio	\$256,212.38
Costo materiales relleno	\$71,127.39
Costo de maquinaria, perforación y mano de obra	\$4,021,239.78
Total Inversión	\$4,348,579.55

La inversión requerida para las diferentes cargas será proporcional para el número de matrices de agujeros o circuitos requeridos. Es decir que, para carga completa, donde se requiere 3 circuitos, la inversión requerida será 3 veces la calculada en la tabla 3.9.

**Tabla 3.10 Inversión para cada porcentaje de carga.**

Sistema Geotérmico	Inversión
Carga Completa (100%)	\$13,041,418.66
Carga al 67%	\$8,694,279.10
Carga al 50%	\$6,519,058.26
Carga al 33%	\$4,347,139.55

Como se observa en la tabla 3.10 la inversión más alta se da al utilizar el sistema geotérmico para remover todo el calor de la edificación, esto se debe a la gran cantidad de agujero requerido y el alto costo en el mercado de la perforación.

Con estos costos de inversión se tiene un valor aproximado de \$7000 por kW instalado y el cálculo de las unidades requeridas para los materiales y tuberías se encuentra en APÉNDICE E.

### **3.3 Simulación**

Las simulaciones realizadas permitieron conocer el consumo energético de los diferentes equipos, en esencial la torre de enfriamiento y el sistema geotérmico. A continuación, se muestran los consumos reportados por las simulaciones para el sistema geotérmico, para los casos de trabajar a carga completa y sus respectivos porcentajes con la finalidad de comparar estos sistemas.

#### **3.3.1 Consumo energético carga completa**

Los sistemas geotérmicos presentan un consumo energético en base a la utilización del sistema de bombeo para la recirculación del agua además de comparar la carga generada en el chiller para su funcionamiento.

La simulación reporta el consumo mensualmente en la tabla 3.11 comparándola con el consumo de las torres de enfriamiento de la línea base, ambos sistemas a carga completa.

Tabla 3.11 Reporte de consumo energético simulado.

Meses	GSHP 100%		Torre Enfriamiento 100%		
	Bomba [kWh]	Chiller [kWh]	Bomba [kWh]	Chiller [kWh]	Ventilador [kWh]
Enero	5391	129098	6148	138479	14004
Febrero	4733	120544	5398	130697	12474
Marzo	5393	134632	6150	146015	14018
Abril	4960	129986	5656	139743	12949
Mayo	5437	134220	6200	141201	14058
Junio	5264	138013	6003	144031	13459
Julio	5177	121307	5904	123872	13579
Agosto	5412	137579	6171	140256	14197
Septiembre	4990	147612	5691	151805	13119
Octubre	5391	141875	6148	144083	14036
Noviembre	5216	141244	5948	143416	13638
Diciembre	4973	115545	5671	116168	11500
Consumo anual	62339	1591656	71088	1659766	161030
Consumo Total	1653994		1891885		

Se observó que el consumo anual del chiller es menor trabajando con GSHP que con CT. Esta variación era de esperarse debido que el compresor disminuye su trabajo con los GSHP. El consumo anual por CT es de 1890 MWh mientras que el GSHP es de 1650 MWh.

Tabla 3.12 Ahorro energético y económico generado a carga completa.

Meses	Ahorro Energético [kWh]	Ahorro Monetario (\$)
Enero	24141	\$ 2,896.98
Febrero	23292	\$ 2,795.00
Marzo	26158	\$ 3,138.90
Abril	23402	\$ 2,808.20
Mayo	21803	\$ 2,616.31
Junio	20216	\$ 2,425.89
Julio	16871	\$ 2,024.56
Agosto	17634	\$ 2,116.06
Septiembre	18011	\$ 2,161.36
Octubre	17001	\$ 2,040.11
Noviembre	16541	\$ 1,984.94
Diciembre	12821	\$ 1,538.54
<b>Consumo anual</b>	237890	\$ 28,546.83

El ahorro energético anual es sustancialmente significativo, dado que al evaluarlo en términos monetarios esto representa un ahorro de \$28,000 a un precio de \$0.12 kWh, como se lo observa en la tabla 3.12.

### 3.3.2 Consumo energético de GSHP con sistema auxiliar de torre de enfriamiento.

Mediante la simulación de los equipos trabajando a diferentes cargas se obtuvieron diferentes consumos de energía como se lo observa en la figura 3.5.

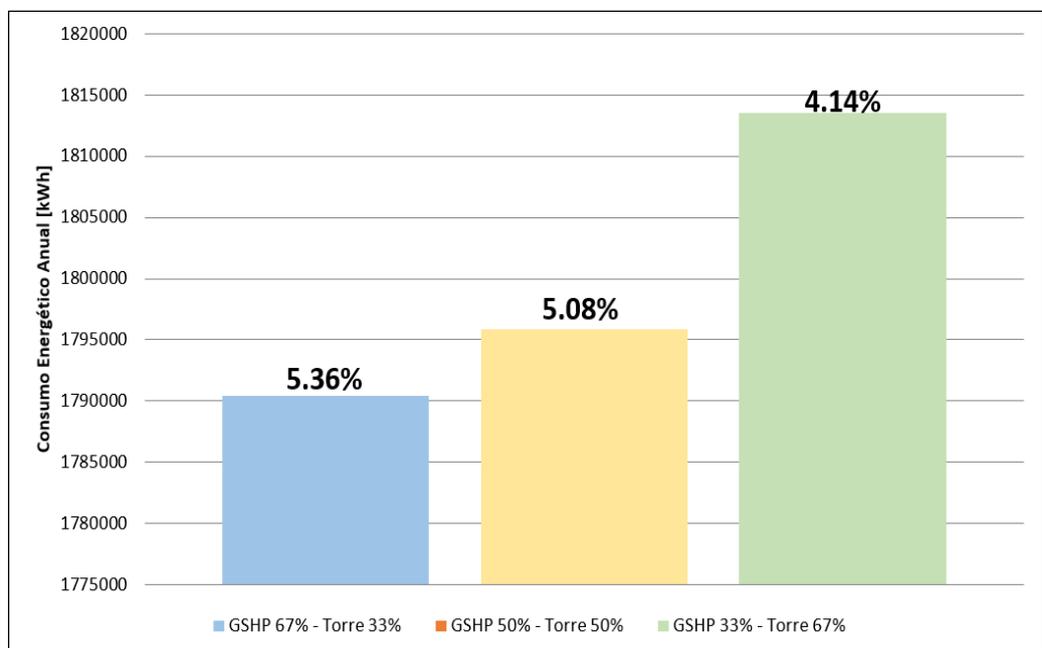


Figura 3.5 Variación del consumo energético en sistemas híbrido y sistema geotérmico.

El mayor consumo reportado es en el sistema híbrido de 50%, el cual trabaja a media carga para ambos equipos seguido del híbrido de 33%. Estos sistemas no superan el consumo desarrollado por las torres de enfriamiento.

### 3.4 Desempeño Energético

Los sistemas evaluados poseen diferentes desempeños lo cual se obtuvieron de la simulación que se observa en la tabla 3.13.

**Tabla 3.13 Desempeño energético de los sistemas geotérmicos.**

Promedio	Sumidero geotérmico	Sistema Híbrido (GSHP 67% - CT 33%)	Sistema Híbrido (GSHP 50% - CT 50%)	Sistema Híbrido (GSHP 33% - CT 67%)
COP	3.656	3.591	3.664	3.564

Las gráficas de la simulación de estos se observan en el APÉNDICE I.

### 3.5 Análisis de costos

Para conocer si es económicamente rentable se realizó cálculos de amortización, la cual depende del valor invertido, el costo de operación y costos de mantenimientos.

#### 3.5.1 Costos operacionales

En los costos de operación, se incluyó el consumo energético de las bombas de recirculación, ventiladores y la demanda de agua por los equipos.

Para conocer el consumo de agua por la torre de enfriamiento se siguieron las relaciones explícitas en el catálogo de (Tecnoequip C.A., 2004). El cálculo de estos valores se presenta en el APÉNDICE E.

En la tabla 3.14 se presentan los valores de operación de cada sistema, incluyendo la torre de enfriamiento trabajando a carga completa y los sistemas híbridos a distintas cargas.

**Tabla 3.14 Costo operacional anual de los sistemas en diferentes cargas.**

	Torre enfriamiento	Sumidero geotérmico	Sistema Híbrido (GSHP 67% - CT 33%)	Sistema Híbrido (GSHP 50% - CT 50%)	Sistema Híbrido (GSHP 33% - CT 67%)
Costo Operativo (CO)	\$60,869.61	\$7,540.68	\$18,643.32	\$22,991.55	\$33,334.83

En el APÉNDICE E se encuentran mayor detalle los cálculos de la tabla 3.14.

### 3.5.2 Costos de torres de enfriamiento

Se tomó en consideración el costo de implementación de torre de enfriamientos para la elaboración de la amortización. Se cotizó y se elaboró una relación de precios para las cargas como se observa en la tabla 3.15. La cotización se encuentra en APÉNDICE H.

**Tabla 3.15 Relación de precio-capacidad de torres de enfriamiento.**

Capacidad (TON)	Costo	Carga
1200	\$ 116,715.79	100%
900	\$ 87,536.84	67%
700	\$ 68,084.21	50%
475	\$ 46,200.00	33%

Los costos de estas torres se sumaron a la inversión de los GSHP para los sistemas híbridos, debido que su implementación requerirá de torres de menor capacidad de las que actualmente cuenta el edificio.

A demás se consideró el precio de la actual torre (2 unidades) más un porcentaje de instalación de 10% dependiendo del costo de la torre. De esta forma se comparan la implementación de los diferentes equipos con respecto al kW instalado en la tabla 3.16.

**Tabla 3.16 Costo de inversión final y kW instalado de cada sistema.**

	Torre enfriamiento	Sumidero geotérmico	Sistema Híbrido (GSHP 67% - CT 33%)	Sistema Híbrido (GSHP 50% - CT 50%)	Sistema Híbrido (GSHP 33% - CT 67%)
Costo inversión (CI)	\$256,774.74	\$13,045,738.66	\$8,743,359.10	\$6,587,142.47	\$4,436,116.39
Costo por kW instalado	\$139.07	\$7,065.70	\$4,735.49	\$3,567.66	\$2,402.64

### 3.5.3 Amortización

Las amortizaciones para cada sistema y operación se presentan a continuación en la tabla 3.17.

**Tabla 3.17 Amortización entre torre de enfriamiento (CT) y los diferentes sistemas.**

CT vs	años
GSHP (100%)	240
Híbrido (GSHP 67%-CT 33%)	201
Híbrido (GSHP 50%-CT 50%)	167
Híbrido (GSHP 33%-CT 67%)	152

Al obtener elevados tiempos de amortización, se decidió realizar un análisis de sensibilidad paramétrico para conocer en qué condiciones el sistema será factible económicamente, estos cálculos de amortización se encuentran en APÉNDICES F.

#### **3.5.4 Análisis de sensibilidad**

Este análisis se lo realizó con la finalidad de determinar en qué condiciones será factible la aplicación de los sistemas geotérmicos para el Ecuador. Este análisis se puede observar en APÉNDICES G.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso del suelo como sumidero de calor por medio de sistemas geotérmicos es de interés en el área de climatización debido a que permite disminuir el consumo energético mensual y presentan un periodo de vida largo con mínimas emisiones de  $CO_2$  al ambiente. Se estudió la factibilidad de instalar estos sistemas en la ciudad de Guayaquil para edificaciones comerciales, como actualmente lo realizan países europeos que aprovechan las propiedades térmicas del suelo a gran escala como lo es en España. El diseño de estos sistemas se realizó esperando sean aplicables a la ciudad de Guayaquil, pero por motivo de costos iniciales de instalación, los estudios de rentabilidad para el caso del gobierno zonal del Litoral no son favorables.

Este trabajo permite un marco de referencia para trabajos futuros, así como una base para procesos de optimización. A demás permite entender el proceso de transferencia de calor geotérmico en Guayaquil y que parámetros requieren mayor atención para que este tipo de instalación llegue a ser rentable en un futuro.

### 4.1 Conclusiones

- Mediante la metodología usada se obtuvo la línea base del edificio Gobierno Zonal del Litoral usando como referencia que los consumos simulados en comparación a los reportados deben satisfacer la tolerancia de los índices de aceptación NMBE y CVRMSE especificados en los lineamientos de la ASHRAE 14.
- Se determinó con el uso del modelo energético calibrado las condiciones de operación de los diferentes equipos que conforman la planta de agua helada del edificio, con lo que se pudo determinar la carga térmica del edificio, los parámetros de diseño de los intercambiadores de calor geotérmicos siendo la carga de diseño 525 TON y el rango de temperatura de enfriamiento del condensador en el circuito de rechazo de calor de 10 °C.

- El suelo de Guayaquil presenta condiciones poco favorables para la implementación de sistemas geotérmicos de tipo vertical, siendo la principal limitante la temperatura elevada que presenta el suelo de la urbe, entre 26°C a 29°C, debido a esto se incrementa de manera considerable el número de intercambiadores necesarios para disipar la carga térmica de diseño. Además, la ciudad de Guayaquil posee una conductividad y difusividad térmica baja.
- El diseño base propuesto, que representa un tercio de la carga total, consta de aproximadamente 330 agujeros, cuya distribución dentro del circuito es una disposición paralela de 16 agujeros con 21 filas, con un caudal de operación por agujero de 0.9 gpm. Para un sistema geotérmico sin torre de enfriamiento auxiliar se requiere estos tres circuitos funcionando de manera conjunta dependiendo de la carga térmica de enfriamiento en el edificio.
- Debido a que la maquinaria necesaria para instalar estos intercambiadores es poco usada en Ecuador, en la costa se tiene registrada una empresa que hace este tipo de perforaciones, siendo estos costos hasta seis veces mayor que los reportados internacionalmente, obteniendo inversiones necesarias para instalar un circuito base alrededor de \$4,000,000. Ocasionando que los tiempos de amortización simple sean elevados, entre 152 a 240 años, en las condiciones actuales en las que se evaluó su implementación.
- Es necesario mencionar que los sistemas híbridos reducen de manera considerable la inversión inicial requerida en comparación al sistema solo geotérmico, esto se debe a que las cargas de diseño se distribuyen entre ambos sistemas. A su vez para sistemas en el cual el suelo se exclusivamente para rechazo de calor de los sistemas de refrigeración permiten controlar que el incremento de la temperatura del suelo debido a la operación de los intercambiadores geotérmicos sea mínimo manteniéndose una eficiencia elevada.

- Sin embargo, los sistemas geotérmicos convencionales e híbridos son una alternativa atractiva desde el punto de eficiencia energética, ya que presentan una necesidad menor de consumo de energía para disipar calor. El ahorro anual obtenido en operación por los diferentes sistemas propuestos se encontró dentro de un rango de \$30000 a \$50000 tomando de referencia costos actuales de energía eléctrica y agua, y esto solo reemplazando la torre de enfriamiento y dejando los demás equipos de sistemas de climatización del edificio sin alterar.
- En los casos de estudios de GSHP se obtuvo un incremento en el coeficiente de rendimiento en los chiller de 4% en el mejor de los casos este rango varía entre 3.564 a 3.664 para los diseños propuestos, este pequeño incremento en la eficiencia energética en estos equipos se explica debido a que la temperatura de operación impuesta en el condensador era elevada por lo que no se obtuvo un ahorro significativo en el consumo energético del chiller de los sistemas propuestos respecto al sistema actual que posee el edificio.
- Mediante el análisis de sensibilidad se determinó que la factibilidad para la implementación de estos los intercambiadores geotérmicos radica principalmente en el costo de perforación y el costo de energía eléctrica. Si se trabajase con un costo de perforación \$20, como se reporta en los costos internacionales, y se dé un aumento en la tarifa de consumo eléctrico a (\$0.20/kWh), se obtienen menores tiempos de amortización para el sistema híbrido de GSHP al 33% a 23 años y un ahorro de \$38,000; con los cuales se justifica la implementación de estos sistemas mientras que para el sistema geotérmico 100% un ahorro de \$67,000 y un tiempo de amortización simple de 43 años.
- También se analizó el caso en que una ciudad del Ecuador presentase una temperatura de suelo a 16°C, una temperatura promedio reportada en otras ciudades donde se aplica este sistema. Este parámetro redujo a un 40% el número de perforaciones requeridas para la carga de diseño de 525 TON por lo que se disminuyó considerablemente el gasto de instalación, si se

considera un coste de perforación de \$20 y manteniendo el coste de kWh en \$0.12 se obtuvo un ahorro anual de \$100,000 y un periodo de amortización de 17 años para sistemas que solo presenten intercambiadores geotérmicos sin torres de enfriamiento auxiliar.

- La implementación de sistemas geotérmicos de tipo vertical en ciudades de clima cálido y húmedo como se da en la zona de la costa ecuatoriana presentan un ahorro económico y energéticos considerables y pueden ser económicamente factibles si se tienen condiciones del suelo favorable, principalmente una temperatura menor que la temperatura de bulbo húmedo del ambiente, también con disminución de costes de perforación e incrementos en la tasa de kWh estos sistemas se tornan alternativas atractivas a las torres de enfriamiento.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Para obtener un modelo mejor calibrado en los equipos se recomienda realizar mediciones de los principales parámetros de estos con el fin de crear un archivo histórico que permita predecir un comportamiento futuro en otro tipo de condiciones y aplicando otros sistemas de rechazo de calor.
- Evaluar diferentes configuraciones en la instalación de los intercambiadores en la ciudad de Guayaquil debido que al ser la temperatura del suelo elevada no se tiene una ventaja significativa en el área de eficiencia energética por lo que instalaciones de tipo horizontal y slinky se pueden tornar más rentables.
- Para este tipo de sistemas es necesario realizar un estudio previo del suelo a trabajar, para conocer su composición, tipo y propiedades. A demás de conocer hasta que profundidad es viable perforar evitando el efecto sifón en los pozos.
- Para trabajos posteriores se recomienda considerar como afecta el nivel freático en el proceso de transferencia de calor, debido que esto puede

ocasionar gradientes de temperatura favorables a la hora de transferir calor al suelo, por lo que medir estos parámetros en diferentes épocas del año permitirá establecer una referencia.

- En la implementación de este sistema para edificaciones de alta demanda de refrigeración se recomienda el uso de una torre de enfriamiento auxiliar debido al desbalance térmico que se ocasiona al suelo puede llevar a un incremento excesivo en la temperatura del suelo tornando estos sistemas ineficientes, al implementar una torre de enfriamiento auxiliar que sea operada para disipar parte del calor acumulado en el suelo se llega a controlar el incremento de temperatura de este.
- Se puede evaluar el uso de este tipo de sistemas geotérmicos para edificaciones que posean cargas picos elevadas en comparación al promedio de las cargas térmicas, como se dan en los centros de convenciones, edificios con auditorios y teatros.
- Realizar una caracterización de las condiciones térmicas del suelo del Ecuador para determinar en qué ciudades este tipo de sistemas se torna

# BIBLIOGRAFÍA

- Allan, M. L., & Philippacopoulos, A. J. (1999). PROPERTIES AND PERFORMANCE OF CEMENT-BASED GROUTS FOR GEOTHERMAL HEAT PUMP APPLICATIONS. (No. BNL--67006, EB4001, 751116). <https://doi.org/10.2172/751116>
- Barra, I. (2013). Diseño y Cálculo para Red de Abastecimiento de Agua Proveniente de un Lago y Remoción de Aguas Residuales de Comunidad Suburbana. Del Bío-Bío, Concepción.
- Birchfield, J. W., Kester, W., & Cho, J. (2014). Design and Economic Analysis of a Geothermal Vertical Coupled Heat Pump System for the University of Tennessee, Knoxville Campus, 42.
- Chang, S. K. (2009). Increasing Cooling Tower Water Efficiency. Caltech. Recuperado de [http://www.sustainability.caltech.edu/documents/33-chang\\_sub\\_final\\_paper.pdf](http://www.sustainability.caltech.edu/documents/33-chang_sub_final_paper.pdf)
- Chiasson, A. (2006). FINAL REPORT LIFE-CYCLE COST STUDY OF A GEOTHERMAL HEAT PUMP SYSTEM. Oregon: Midwest Research Institute, National Renewable Laboratory.
- CONELEC. (2013). Estudio y gestión de la demanda eléctrica (PLAN MAESTRO DE ELECTRIFICACION 2013-2022). MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGIA RENOVABLE.
- Ghahramani, A., Karvigh, S. A., & Becerik-Gerber, B. (2017). HVAC system energy optimization using an adaptive hybrid metaheuristic. *Energy and Buildings*, 152, 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.053>
- Hackel, S. P. (s. f.). Development of Design Guidelines for Hybrid Ground-Coupled Heat Pump Systems, 20.
- Hensen, J., & Lamberts, R. (Eds.). (2011). Building performance simulation for design and operation. London; New York: Spon Press.
- INER. (2015). MANUAL TÉCNICO DEL USO DEL TERRENO EN APLICACIONES DE GEOTERMIA DE BAJA TEMPERATURA, 64.
- Johansson, T. B., Patwardhan, A., Nakićenović, N., Gomez-Echeverri, L., & International Institute for Applied Systems Analysis (Eds.). (2012). Global Energy Assessment (GEA). Cambridge : Laxenburg, Austria: Cambridge University Press ; International Institute for Applied Systems Analysis. Recuperado de

<http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA-Summary-web.pdf>

- Kasten, D., & Muller, M. R. (2007). Assessing the Performance of Cooling Towers and Their Effect on Chiller Efficiency, 6.
- Kavanaugh, S. P., & Rafferty, K. D. (2014). Geothermal heating and cooling: design of ground-source heat pump systems. Atlanta: ASHRAE.
- Lý, F. (2015). Interpretation of Borehole Heat Exchanger Thermal Response Tests underground water influence: analysis of three case studies (Master). POLITECNICO DI MILANO, Milán.
- Martín, G. (2012). Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Sevilla. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5091/>
- THE WEATHER COMPANY. (2017). WeatherUnderground. (IBM) Retrieved 4 01, 2019, from Weather Underground: <https://www.wunderground.com/weather/ec/pajan/IPAJAN5>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Soriano, G., Espinoza, T., Villanueva, R., Gonzalez, I., Montero, A., Cornejo, M., & Lopez, K. (2017). Thermal geological model of the city of Guayaquil, Ecuador. *Geothermics*, 66, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.11.003>
- Tecnoequip C.A. (2004). ¿CUÁNTO CONSUME EN AGUA TU TORRE DE ENFRIAMIENTO (TE)?
- TIGRE. (2011). Polietileno Manual Técnico, 32.

# APÉNDICES

# **APÉNDICE A**

## **PLANOS ARQUITECTÓNICOS**



Km. 3 vía a Samborondón  
 Guayaquil - Ecuador  
 Telf.: (083 4) 263 3800  
 Fax.: (083 4) 263 6941  
 www.conalba.com

OBSERVACIONES

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
 MATRIZ

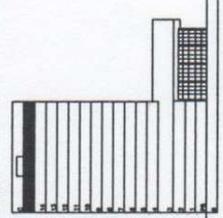
DISEÑO

Piso 15  
 Levantamiento

CAMBIO DE AREA

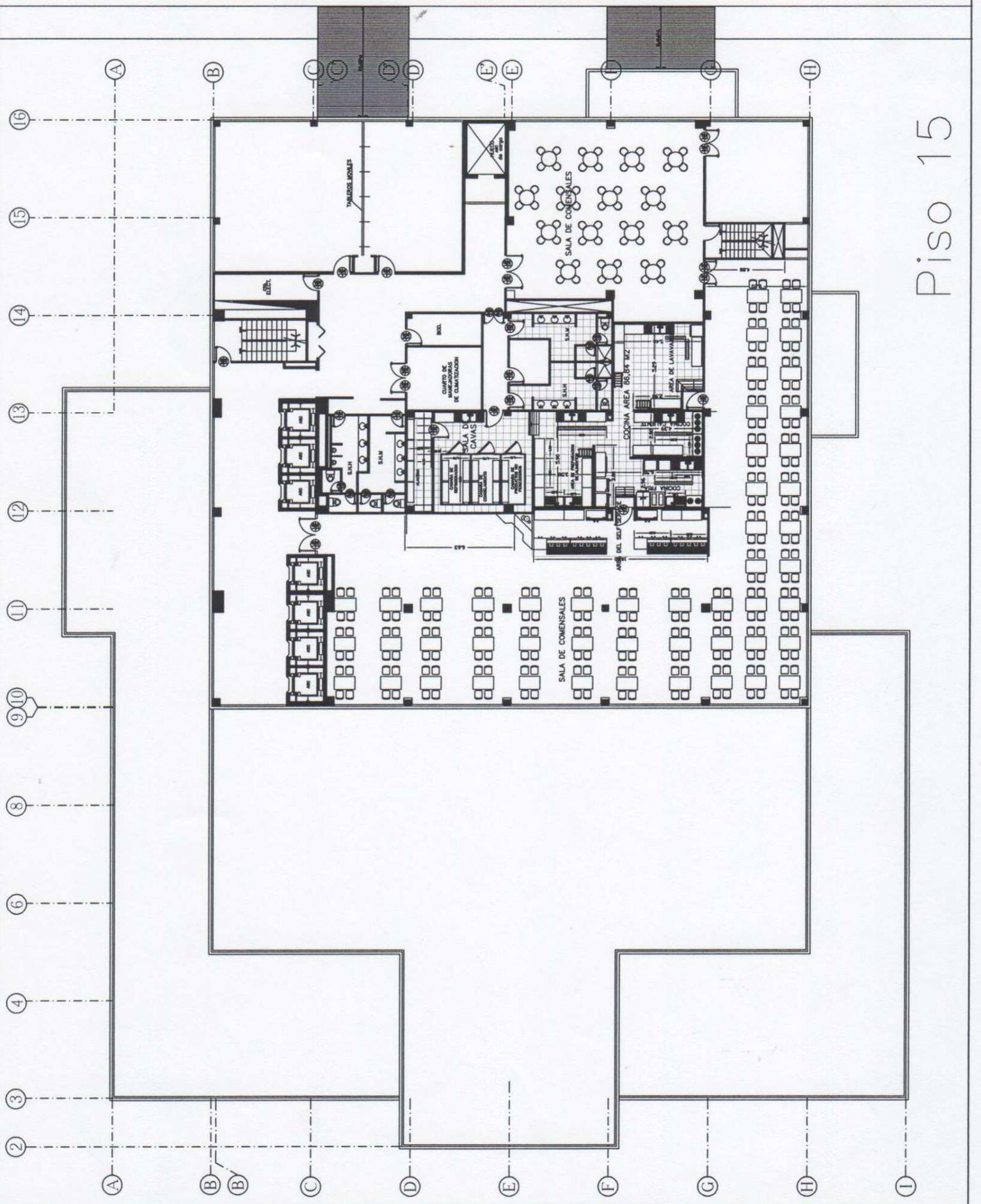
Area Total del Piso 1317,80 m<sup>2</sup>

UBICACION



LABORA	FECHA
11/05	02/08/2008
SERIAL	DESCRIPCION
JUN - JUL	
ESCALA	1:500
ING - FILE	
Piso 1	
LEVANTAMIENTO	
Banco Progreso	

Piso 15





Km. 3 via a Samborondon  
Guayaquil - Ecuador  
Tel.: (593 4) 283 3800  
Fax.: (593 4) 283 6541  
www.conalba.com

DESERVICIOS

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
MATRIZ

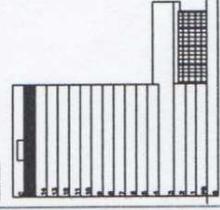
CANTON

Piso 15  
Levantamiento

CUBIERTA DE AREA

Area Total del Piso 1317.80 m<sup>2</sup>

SECCIONES



LAMINA 11150

FECHA 11/10

REVISOR JON - JAV

PROYECTISTA

DECIMEMBRE 2005

ESCALA GRAYSON

PAG - FOLIO

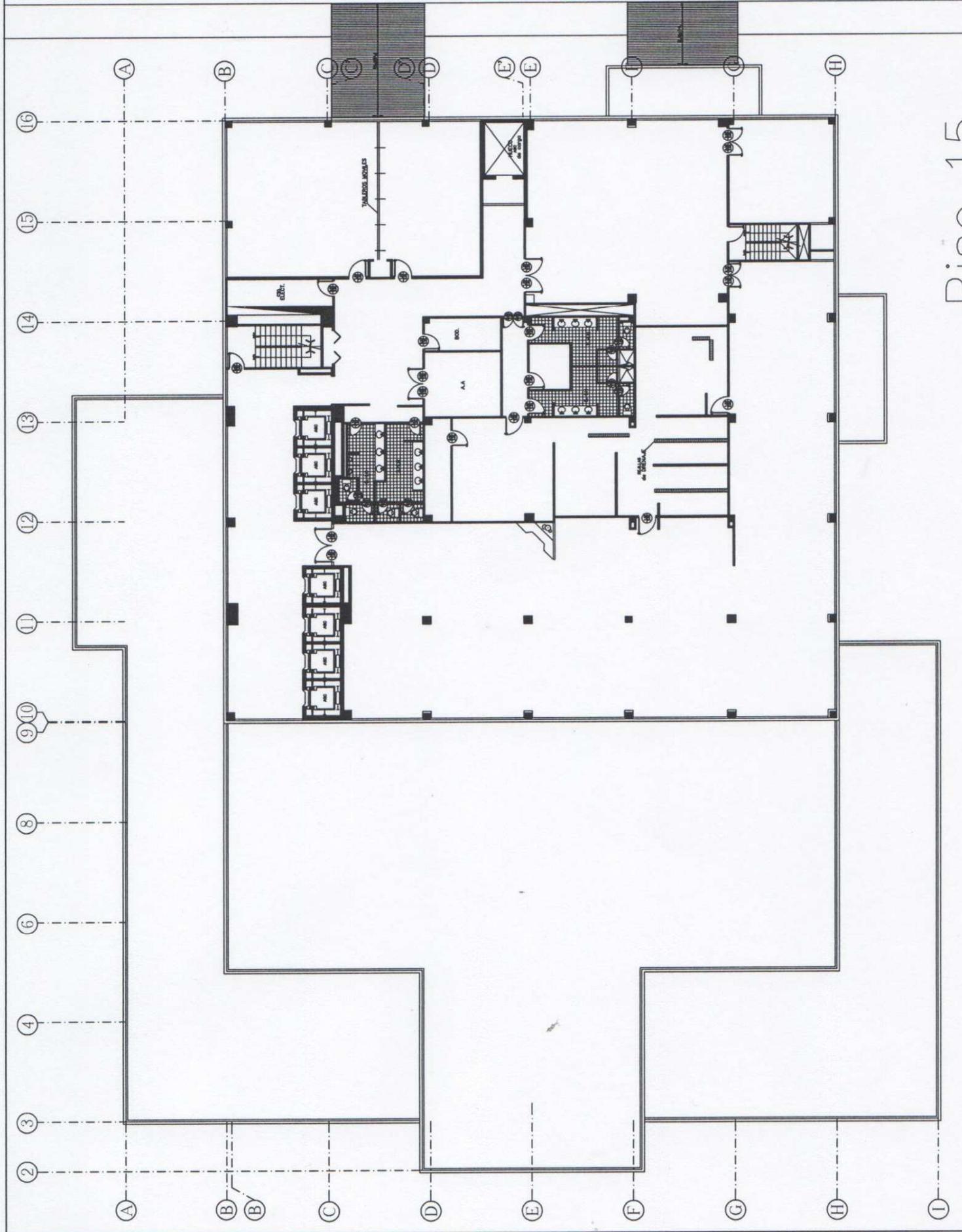
Piso 1

Levantamiento Banco Progreso

CONALBA

LP1515

de 15



Piso 15



Km. 3 Via a Samborondon  
Guayaquil - Ecuador  
Tel.: (593 4) 283 9800  
Fax.: (593 4) 283 6541  
www.conalba.com

DESPACHOS

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
MATRIZ

CONTENIDO

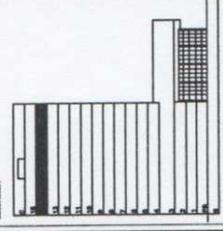
Piso 14  
Levantamiento

CUBIERTA DE AREA

Piso 14 1149,28 m<sup>2</sup>  
Area de Circulacion 168,52 m<sup>2</sup>

Area Total del Piso 1317,80 m<sup>2</sup>

SECCIONES



LAMINA 11180  
FECHA JUN - JUL  
DICIEMBRE 2009

ESCALA 1/500

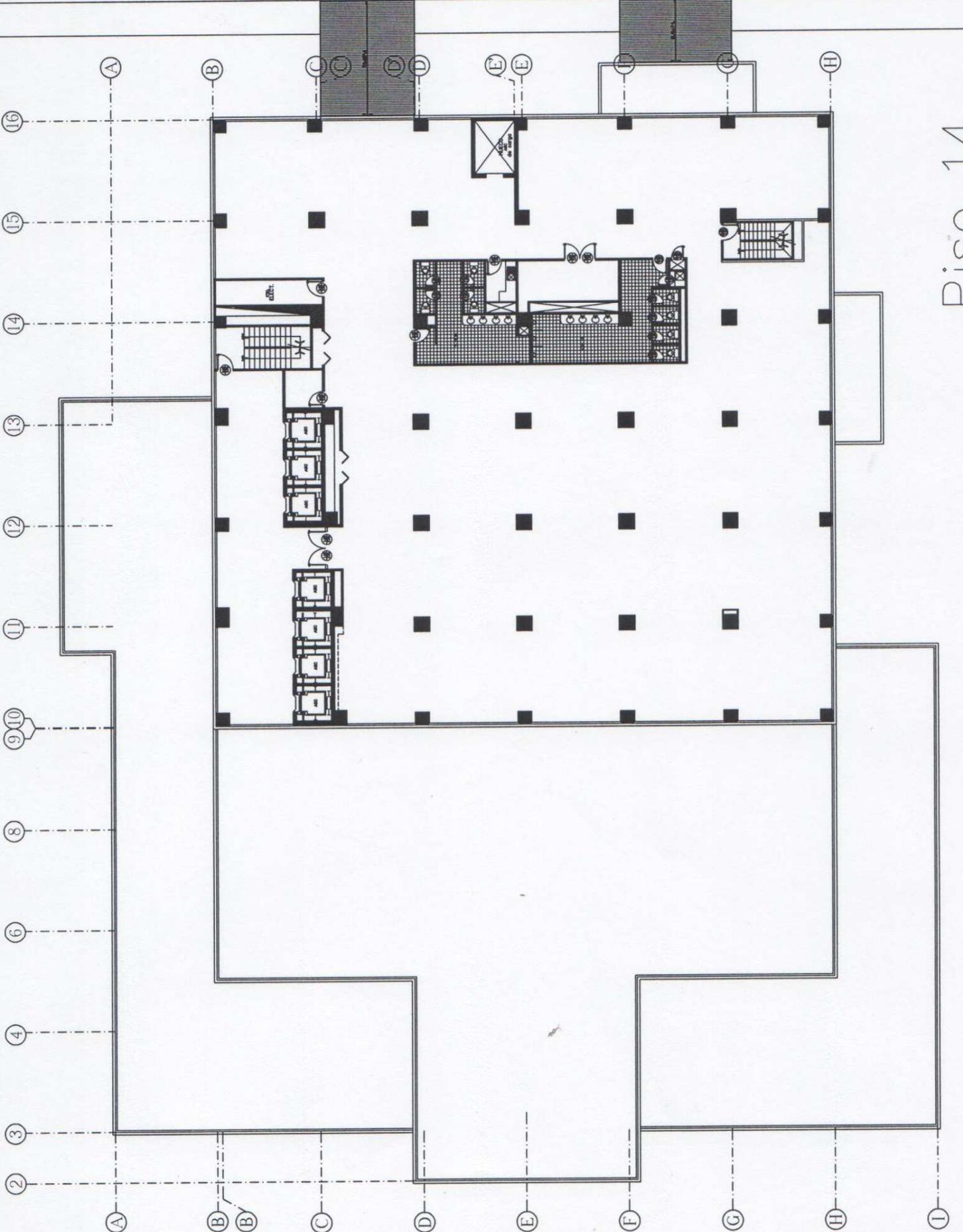
PROYECTO

Piso 1

Levantamiento Banco Progreso

del 14

LP 114



Piso 14



Km. 3 via a Samborombón  
 Guayaquil Ecuador  
 Telf : (593 4) 268 6500  
 Fax : (593 4) 268 6541  
 WWW.CONALBA.COM

RESERVACIONES

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
 MATRIZ

CONTENIDO

Piso 13  
 Levantamiento

CUADRO DE ÁREAS

Piso 13	1149.28 m <sup>2</sup>
Área de Circulación	168.52 m <sup>2</sup>
Área Total del Piso	1317.80 m <sup>2</sup>

INDICACION



LAYERS

LAYERS	11150
RELLIDO	JUN - JUN
FECHA	NOVIEMBRE 2005

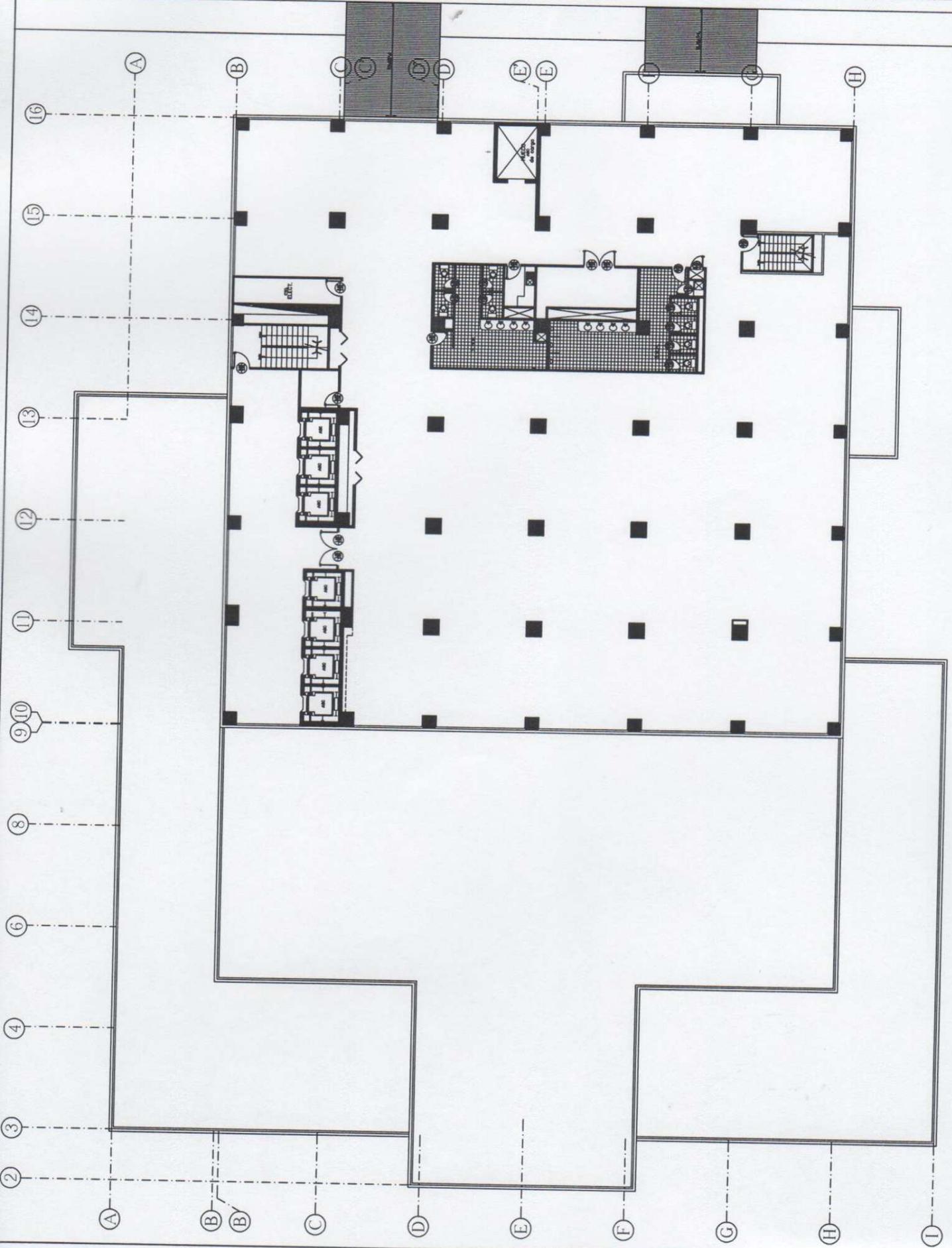
ESCALA GRAFICA



INSC - FILE

INSC - FILE	LP13
LAYERS	de 13

Piso 1  
 Levantamiento Banco Progreso



Piso 13



Km. 3 via a Semberondon  
Guayaquil - Ecuador  
Telf.: (593 4) 283 3900  
Fax.: (593 4) 283 6541  
www.conalba.com

RESERVACIONES

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
MATRIZ

CONTENIDO

Piso 12  
Levantamiento

CAMBIO DE AREA

Piso 12	1149.28 m <sup>2</sup>
Area de Circulacion	168.52 m <sup>2</sup>

Area Total del Piso 1317.80 m<sup>2</sup>

RESERVACION

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

LAMINA

11180

EMBAJO

JUN - JUN

FECHA

DIC/2006

ESCALA

1:100

LAMINA

LP12

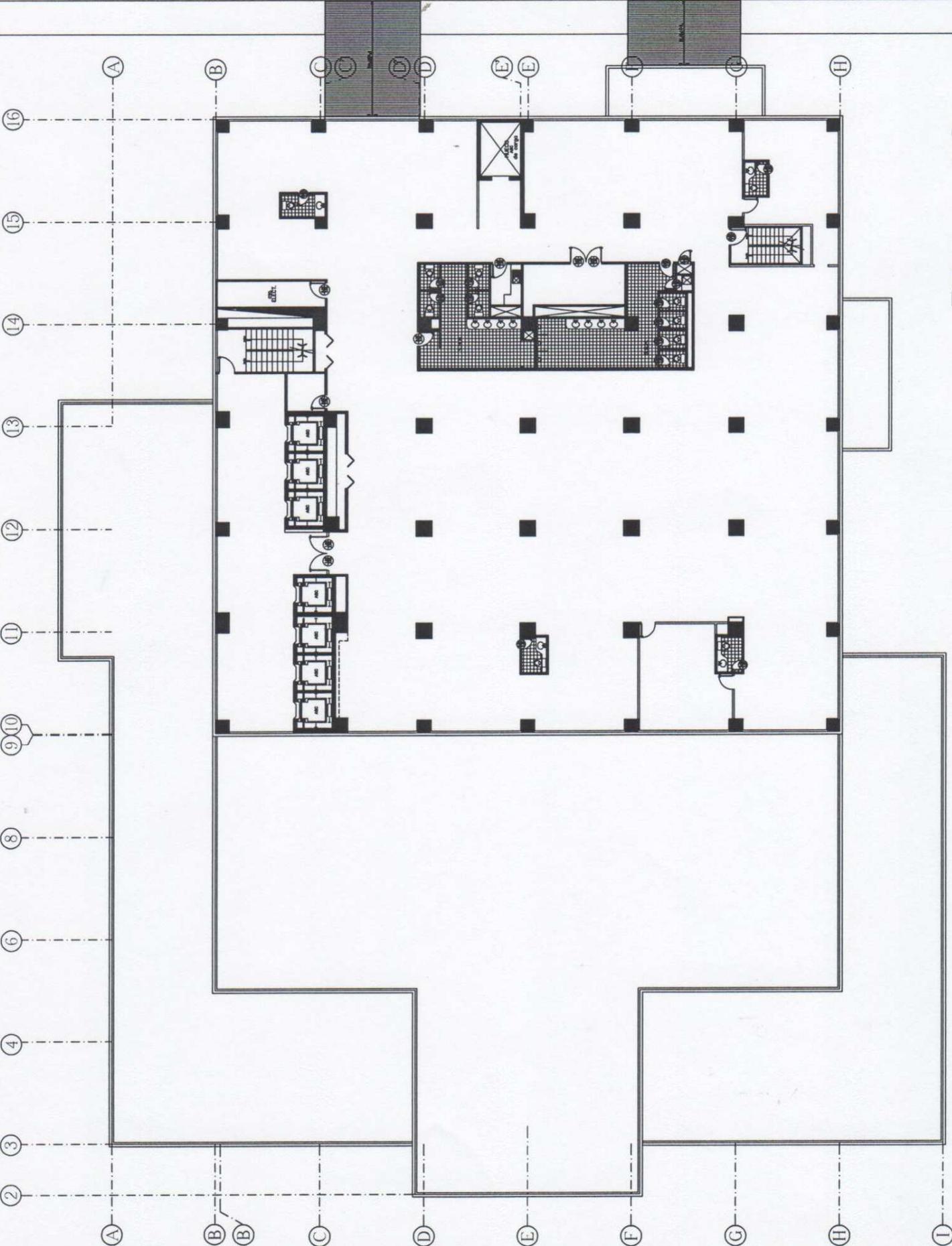
FIG - FILE

Piso 1

Levantamiento

Banco Progreso

Piso 12





Km. 3 via a Samborondón  
 Guayaquil - Ecuador  
 Telf.: (593 4) 283 3900  
 Fax.: (593 4) 283 6541  
 www.conalba.com

SERVICIOS

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
 MATRIZ

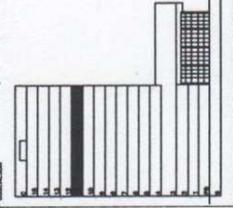
CONTENIDO

Piso 11  
 Levantamiento

CANTIDAD DE ÁREAS

Piso 11	1149,28 m <sup>2</sup>
Área de Circulación	168,52 m <sup>2</sup>
<input checked="" type="checkbox"/> Área Total del Piso	1317,80 m <sup>2</sup>

UBICACION



LAVADO 11150

SEALUP JUN - JUN

FECHA: DICIEMBRE 2005

ESCALA GRAFICA



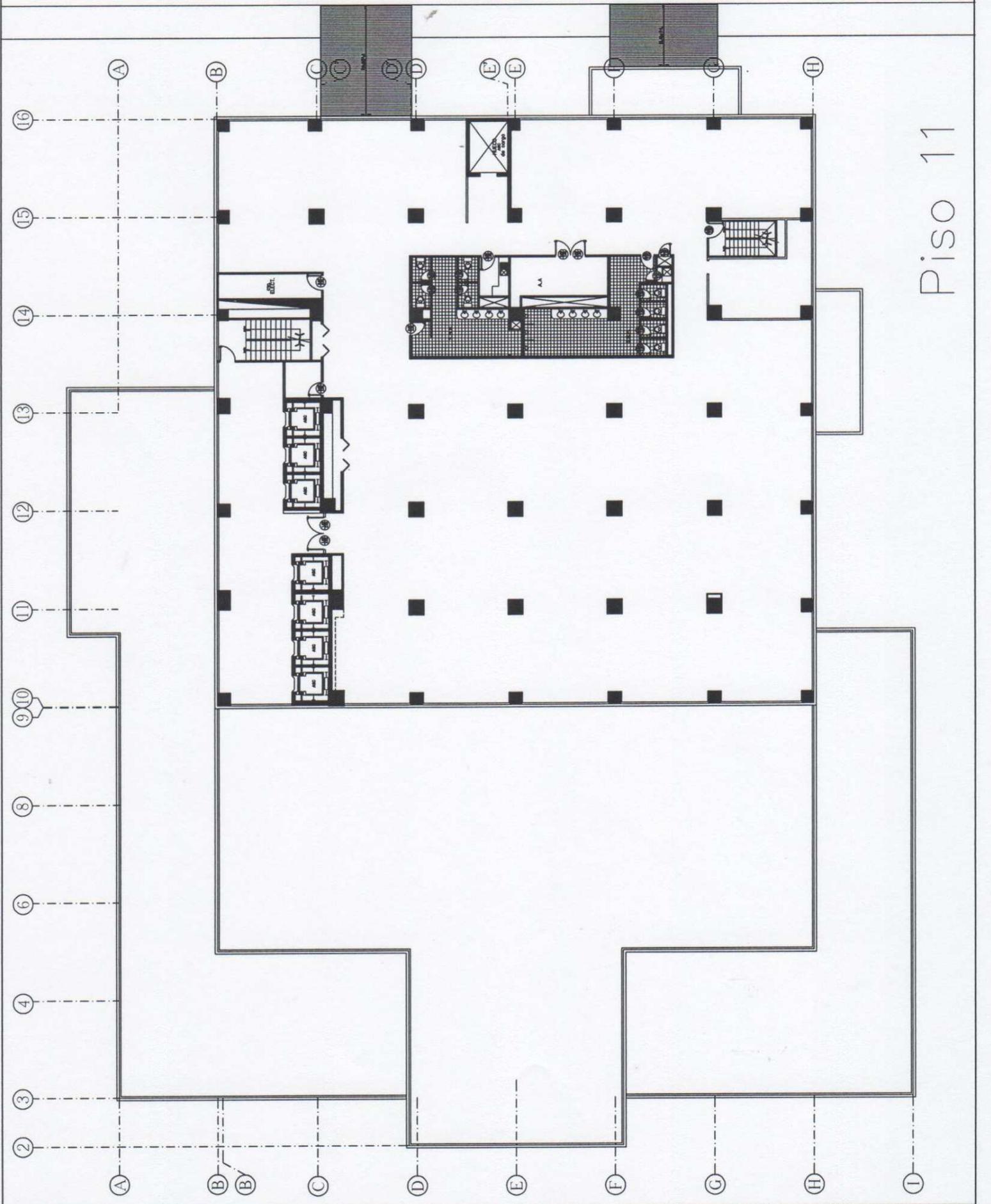
BMS - FILE

LAVADO

Piso 1

Levantamiento Banco Progreso

de 18



Piso 11



Km. 3 Vía a Samborondón  
Guayaquil - Ecuador  
Tel.: (593 4) 283 3800  
Fax.: (593 4) 283 6541  
www.conalba.com

SEÑALACIONES

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
MATRIZ

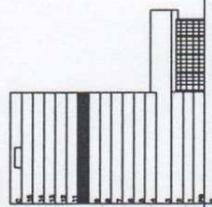
CONTENIDO

Piso 10  
Levantamiento

CONTENIDO DE ÁREAS

Piso 10	1149,28 m <sup>2</sup>
Área de Circulación	166,52 m <sup>2</sup>
Área Total del Piso	1317,80 m <sup>2</sup>

SEÑALACION



LÁMINA

11150

ESCALA GRAFICA

1:50

PROYECTO

11150

ESCALA GRAFICA

1:50

PROYECTO

11150

ESCALA GRAFICA

1:50

PROYECTO

11150

ESCALA GRAFICA

1:50

LÁMINA 11150

ESCALA GRAFICA

1:50

PROYECTO

11150

ESCALA GRAFICA

1:50

PROYECTO

11150

ESCALA GRAFICA

1:50

PROYECTO

11150

ESCALA GRAFICA

1:50

LÁMINA

11150

ESCALA GRAFICA

1:50

PROYECTO

11150

ESCALA GRAFICA

1:50

PROYECTO

11150

ESCALA GRAFICA

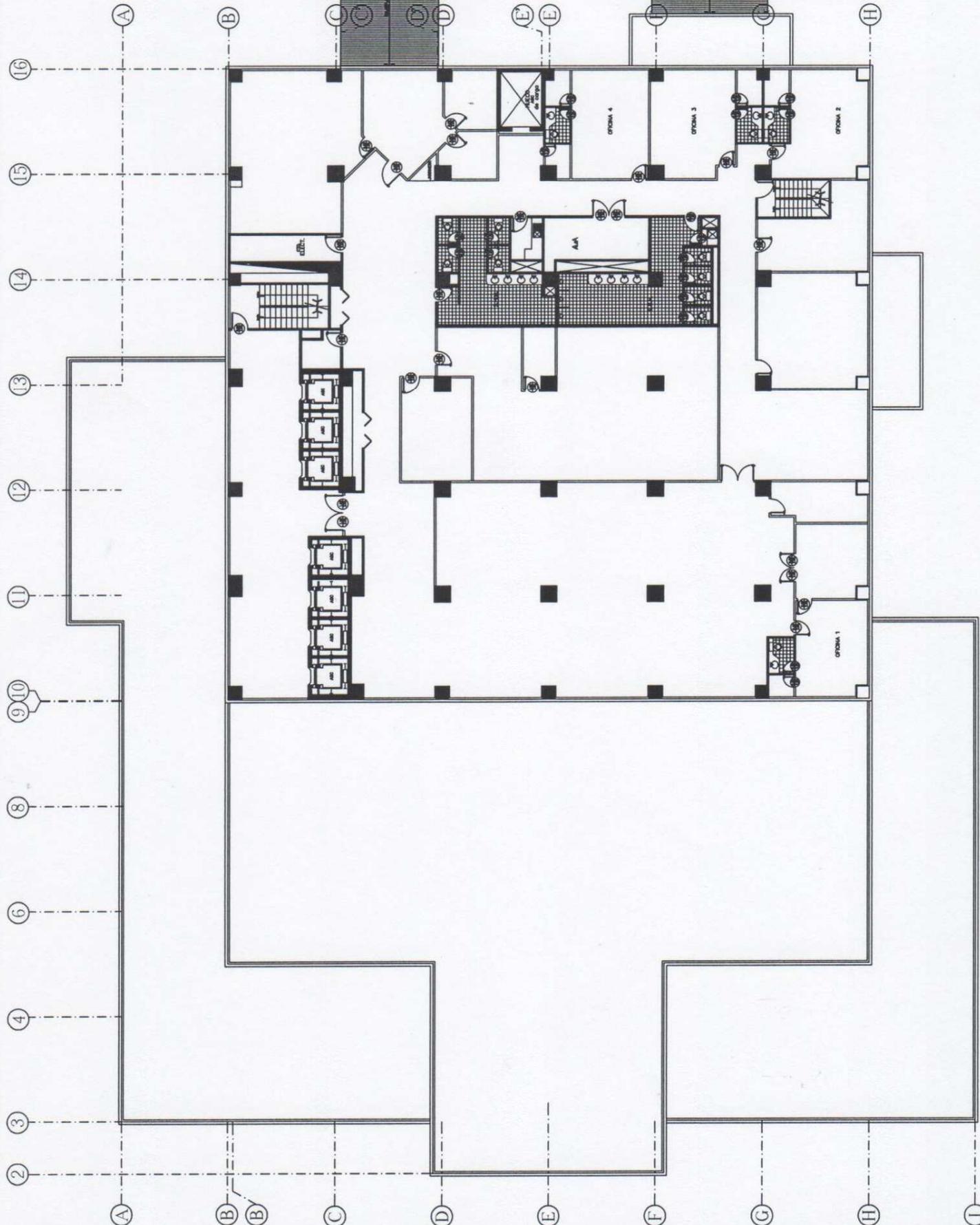
1:50

PROYECTO

11150

ESCALA GRAFICA

1:50



Piso 10



Km. 3 via a Samborondon  
Guayaquil - Ecuador  
Telf.: (593 4) 283 3900  
Fax.: (593 4) 283 6541  
www.conalba.com

RESERVACIONES

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
MATRIZ

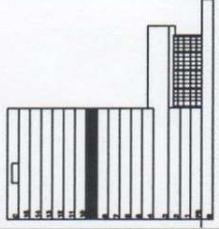
CONTENIDO

Piso 9  
Levantamiento

CUADRO DE ÁREAS

Piso 9	1148,28 m <sup>2</sup>
Área de Circulación	186,52 m <sup>2</sup>
Área Total del Piso	1317,80 m <sup>2</sup>

SECCIONES



LÁMINA

11150

REVISÓ

JOM - JM

TECNO

DICIEMBRE 2005

ESCALA GRÁFICA



ING - FILE

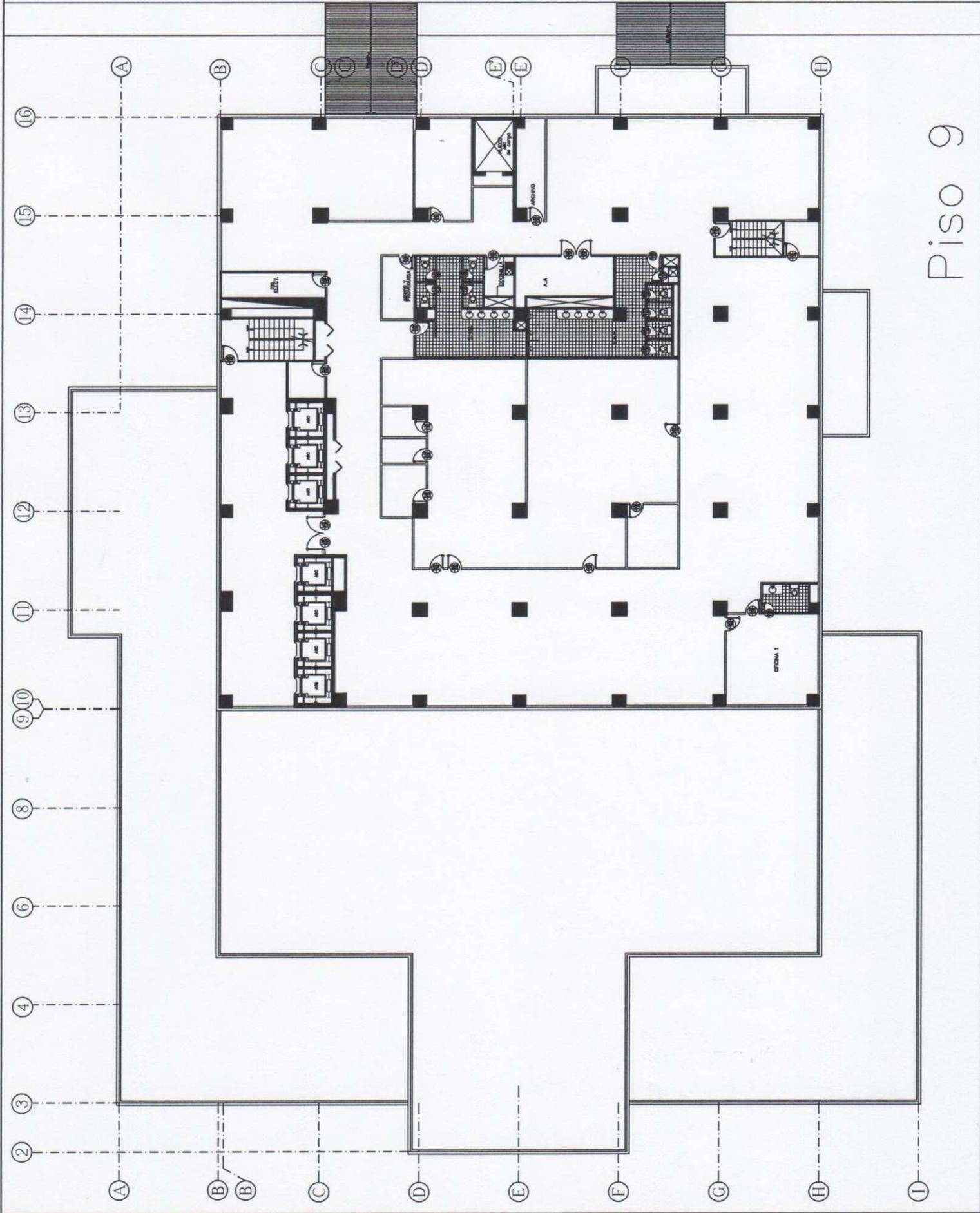
Piso 1

Levantamiento Banco Progreso

LÁMINA

LP 911

de 18



Piso 9



Km. 3 via a Samborondon  
 Guayaquil - Ecuador  
 Telf.: (593 4) 283 3800  
 Fax: (593 4) 283 6541  
 www.conalba.com

DESCRIPCIONES

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
 MATRIZ

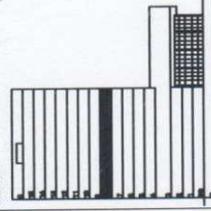
CONTENIDO

Piso 8  
 Levantamiento

CANTIDAD DE AREA

Piso 8	1149.26 m <sup>2</sup>
Area de Circulacion	185.82 m <sup>2</sup>
<input checked="" type="checkbox"/> Area Total del Piso	1317.90 m <sup>2</sup>

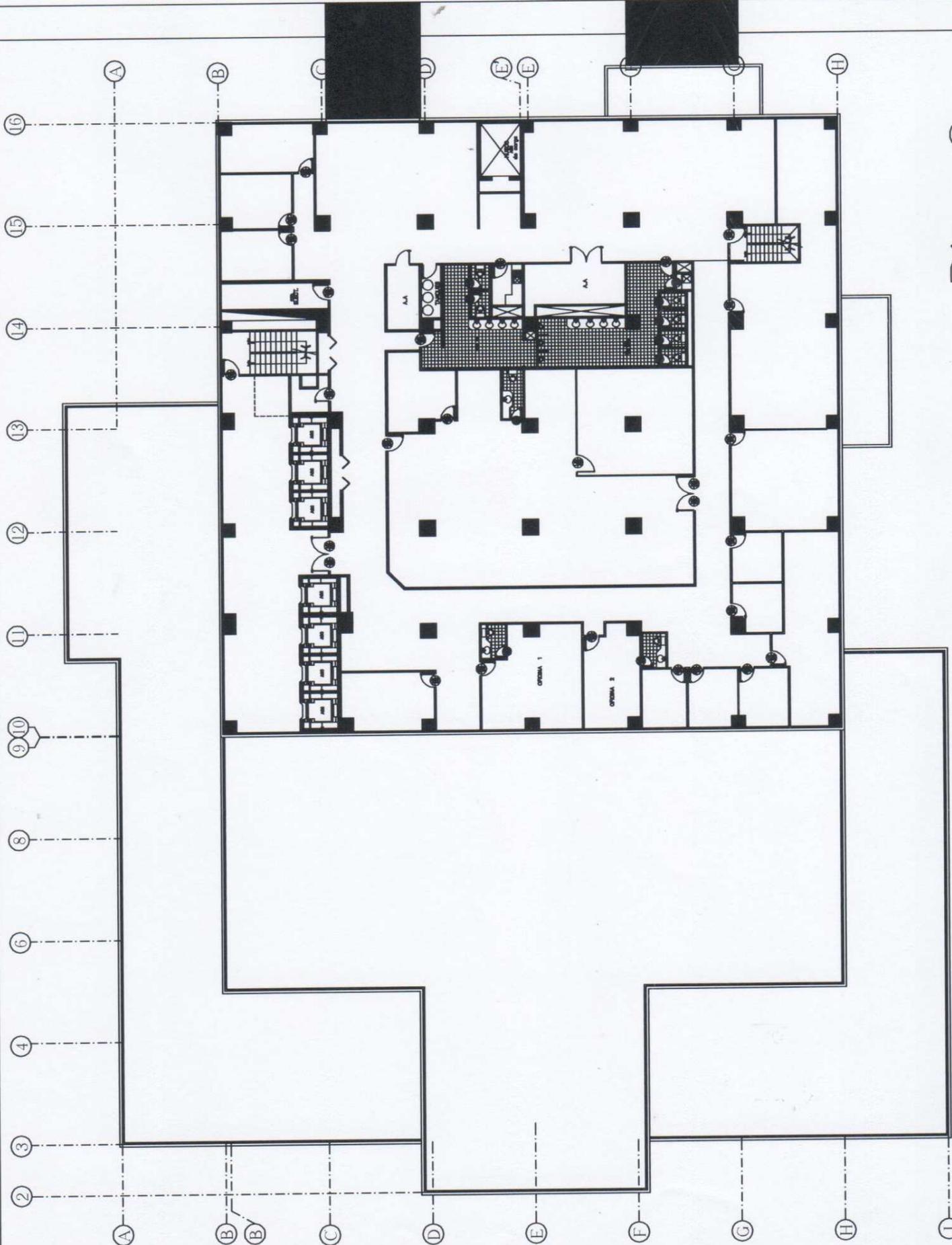
LEGENDAS



LEYES	1/100	SEÑALES	COM - AM	FECHA	DECEMBRE 2009
-------	-------	---------	----------	-------	---------------

ESCALA ARCHITECTONICA

NO. DE PLAZA	LP 81
NO. DE PLAZA	LP 81
NO. DE PLAZA	LP 81



Piso 8



Km. 3 Via a Samborondon  
 Guayaquil - Ecuador  
 Telf.: (593 4) 283 3800  
 Fax.: (593 4) 283 6541  
 www.conalba.com

SERVICIOS

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
 MATRIZ

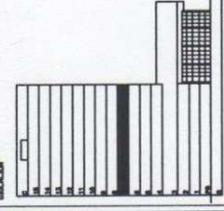
CONTENIDO

Piso 7  
 Levantamiento

CANTON DE ARENAS

Piso 7	1149,28 m <sup>2</sup>
Area de Circulacion	166,52 m <sup>2</sup>
Area Total del Piso	1317,80 m <sup>2</sup>

UBICACION



LAVADO	1:150
SEÑAL	JUN - JUN
FECHA	NOVIEMBRE 2005

ESCALA GRUPOS

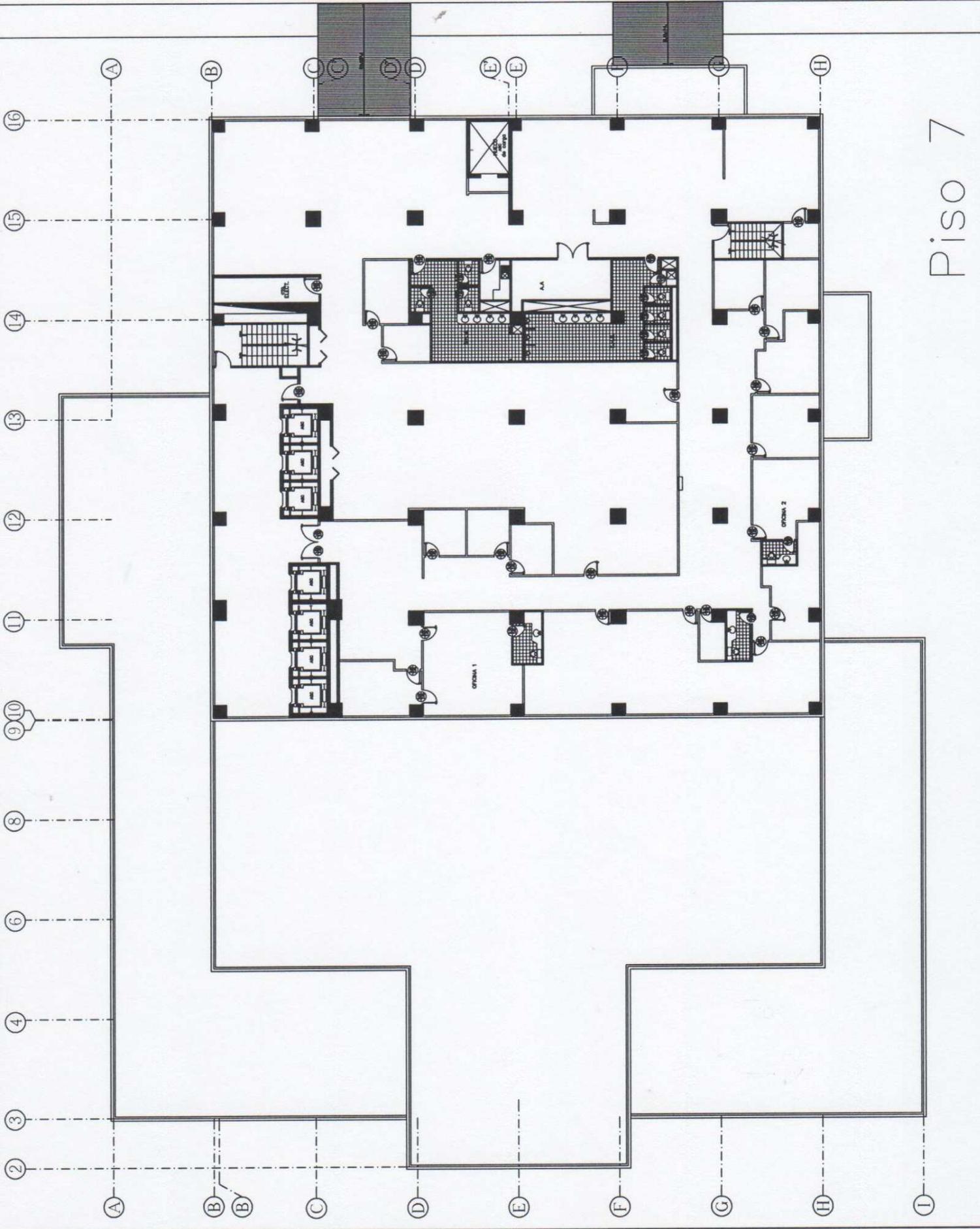


INVI - FILE

Piso 1

Levantamiento  
 Banco Progreso

Piso 7





Km. 3 vía a Samborombón  
Guayaquil - Ecuador  
Tel.: (593 4) 283 3900  
Fax.: (593 4) 283 6541  
www.conalba.com

OBSERVACIONES

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
MATRIZ

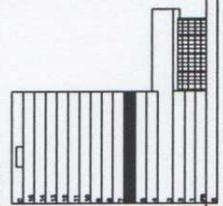
CONTENIDO

Piso 6  
Levantamiento

CANTIDAD DE ÁREAS

Piso 6	1149,28 m <sup>2</sup>
Área de Circulación	166,52 m <sup>2</sup>
<input checked="" type="checkbox"/> Área Total del Piso	1317,80 m <sup>2</sup>

UBICACIÓN



LÁMINA

11150

FECHA

DICIEMBRE 2000

SEALD

JOS - JM

ESCALA GRÁFICA

LÁMINA

CONALBA

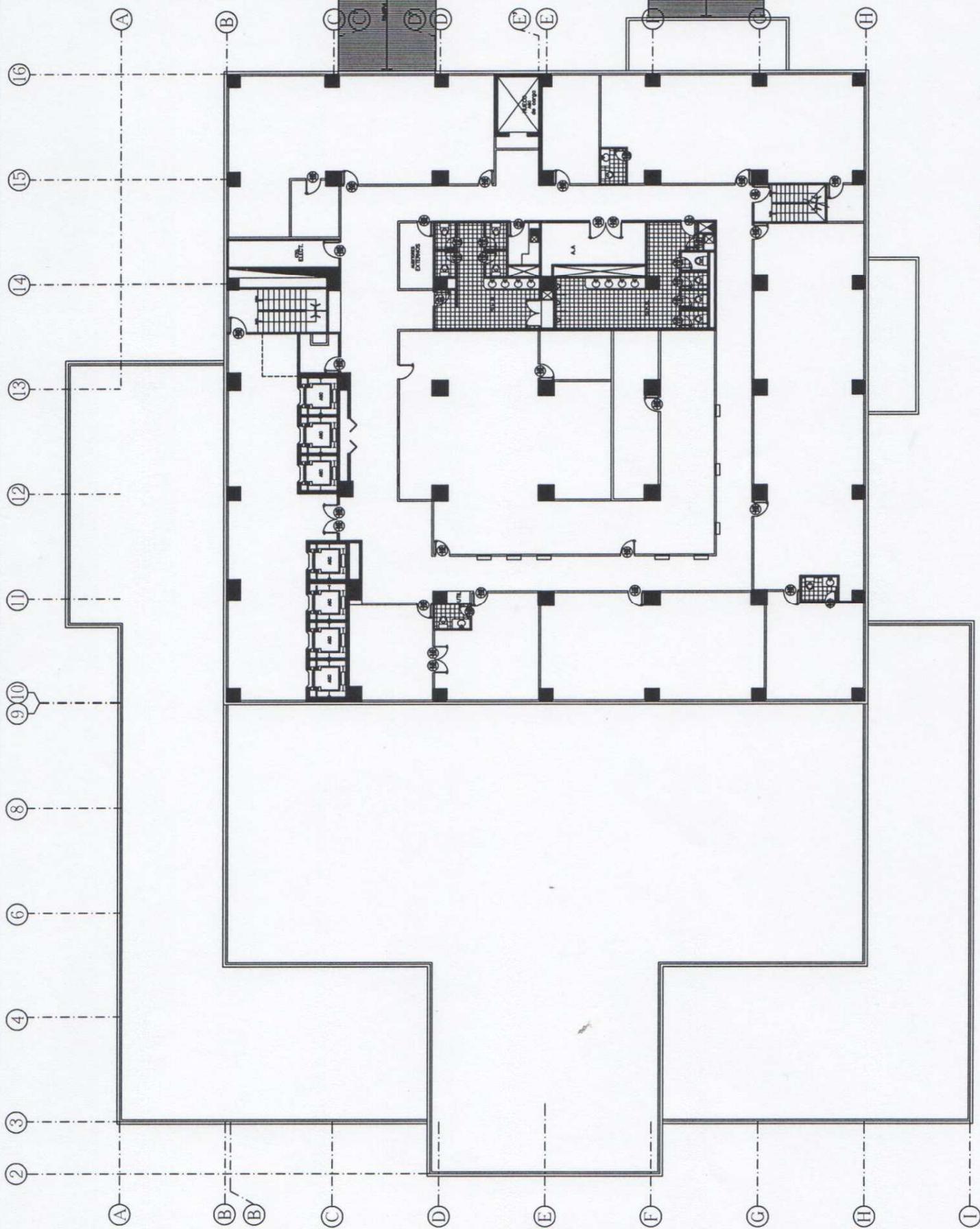
PROYECTO

Piso 1

LEVANTAMIENTO

Banco Progreso

Piso 6





Km. 3 vía a Samborombón  
 Guayaquil - Ecuador  
 Telf.: (593 4) 283 8600  
 Fax.: (593 4) 283 6641  
 www.conalba.com

SERVICIARIOS

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

PROYECTO  
**BANCO DEL PROGRESO**  
 MATRIZ

CONTENIDO  
**Piso 5**  
 Levantamiento

CUADRO DE ÁREAS

Piso 5	1149,28 m <sup>2</sup>
Área de Circulación	188,52 m <sup>2</sup>
Área Total del Piso	1317,80 m <sup>2</sup>

UBICACION



LÁMINA  
 11100

REVISADO  
 JON - JM

FECHA  
 DICIEMBRE 2005

ESCALA GRÁFICA

1:100

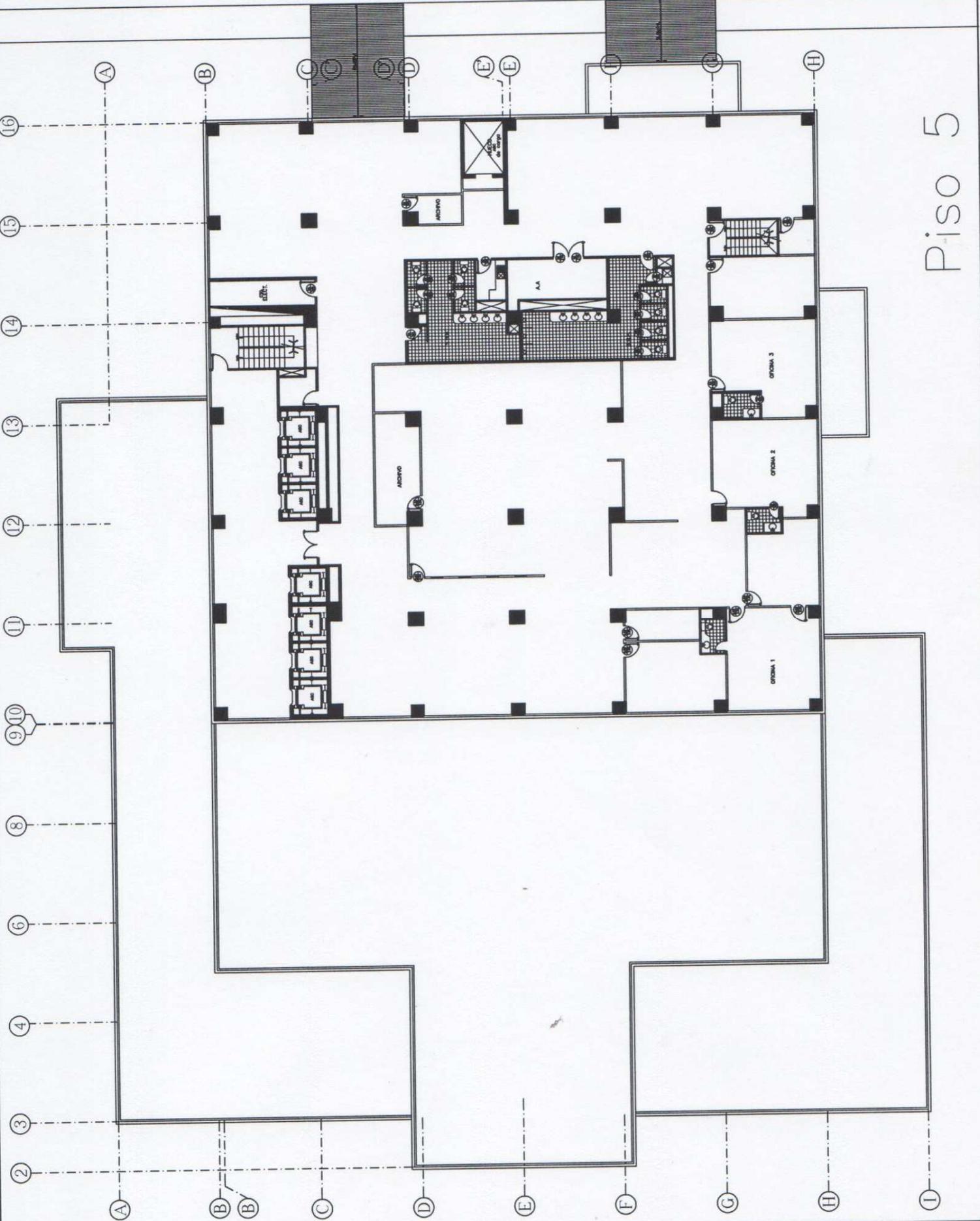
1:100

1:100

1:100

1:100

Piso 5



LP 58  
 de 18



Km. 3 via a Samborondon  
 Guayaquil - Ecuador  
 Telf.: (593 4) 283 3800  
 Fax.: (593 4) 283 6541  
 www.conalba.com

OBSERVACIONES

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
 MATRIZ

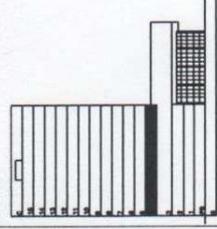
CONTENIDO

Piso 4  
 Levantamiento

CANTIDAD DE AREA

Piso 4	1149.28 m <sup>2</sup>
Area de Circulacion	168.52 m <sup>2</sup>
Area Total del Piso	1317.80 m <sup>2</sup>

UBICACION



LAMINA

11180

FECHA

08 - JUN - JUN

DECEMBER 2008

ESCALA

1:500

PROYECTO

11180

PROYECTO

111





Km. 3 Vía a Samborondón  
Guayaquil - Ecuador  
Telf.: (593 4) 283 3800  
Fax.: (593 4) 283 6541  
www.conalba.com

RESERVACIONES

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

PROYECTO

BANCO DEL PROGRESO  
MATRIZ

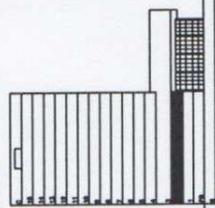
CONTENIDO

Piso 2  
Levantamiento

CARGO DE AREA

Piso 2	1448,64 m <sup>2</sup>
Doble altura a PB	950,11 m <sup>2</sup>
Doble altura Ingreso 0H14.61 m <sup>2</sup>	
X Area Total del Piso 2513,35 m <sup>2</sup>	

RESERVACION



ESCALA: MATRIZ

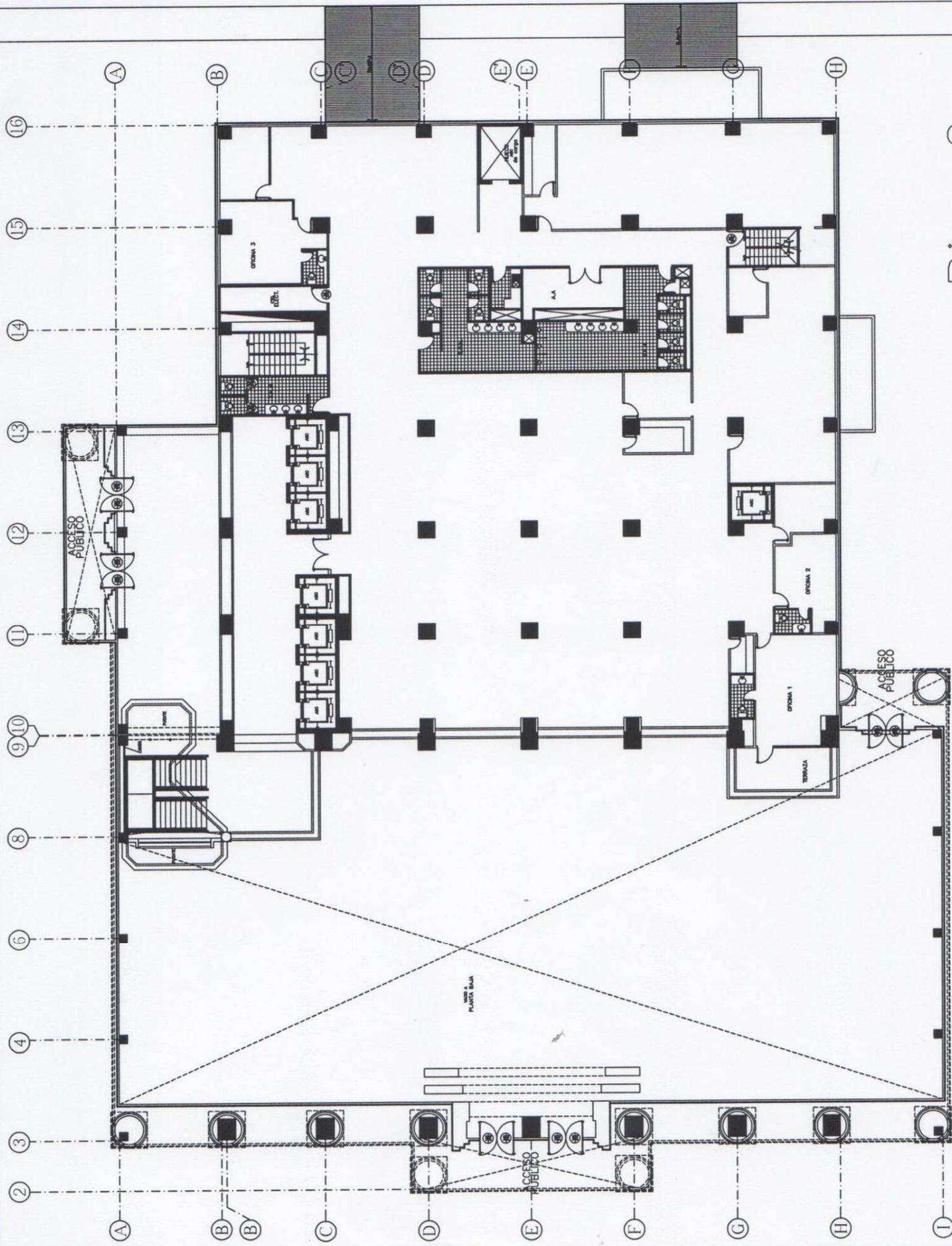
LÁMINA	11150	FECHA	NOVIEMBRE 2000
REVISOR	JOM - JMY		

ING - FILE

Piso 2

Levantamiento  
Banco Progreso

LP 2.5  
de 11



Piso 2



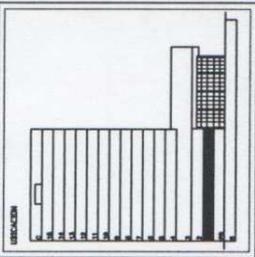
Km. 3 via a Sumborondon  
Guayaquil - Ecuador  
Tel.: (593 4) 283 3900  
Fax.: (593 4) 283 6541  
www.conalba.com

OBSERVACIONES	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

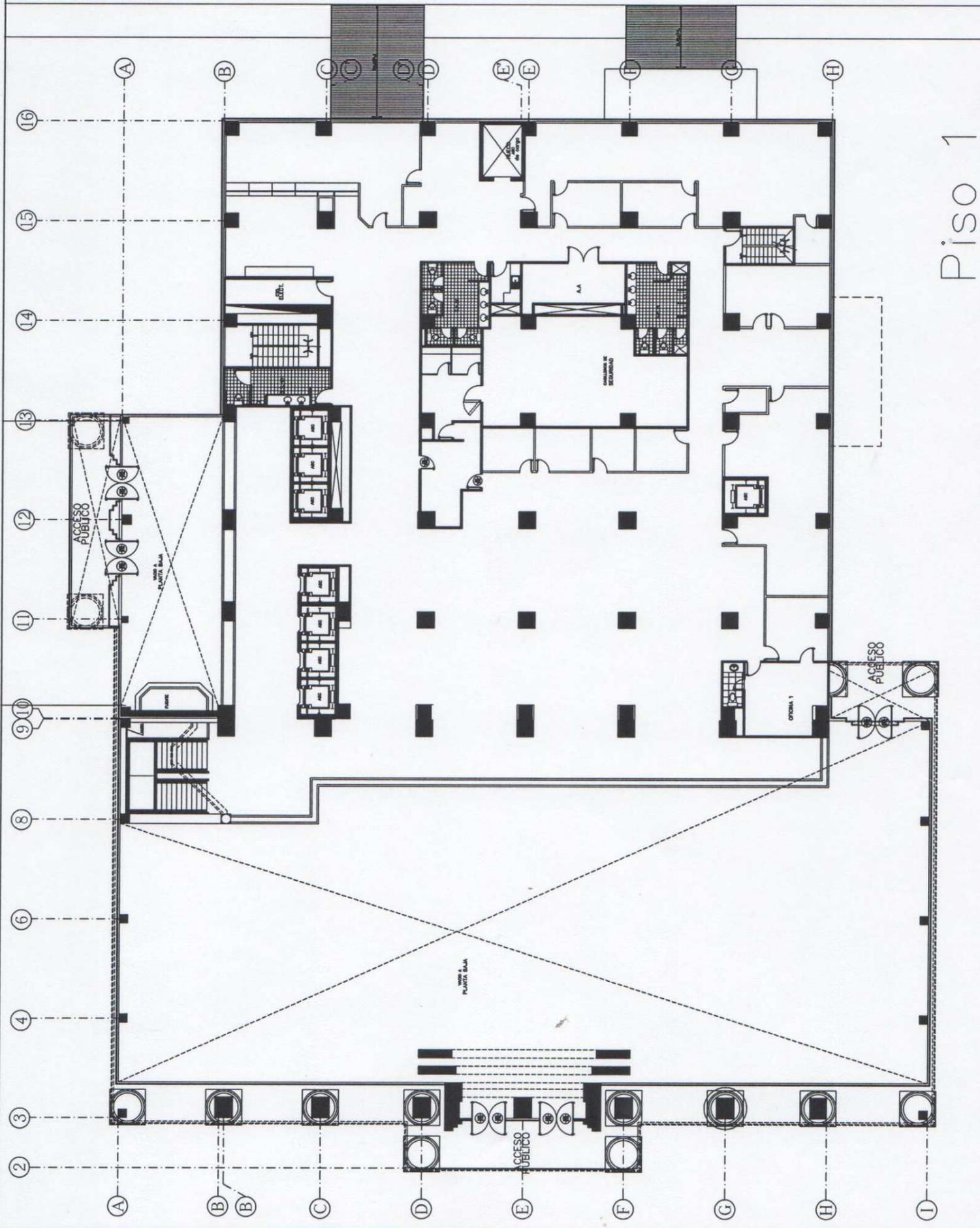
PROYECTO  
**BANCO DEL PROGRESO**  
MATRIZ

CONTENIDO  
**Piso 1**  
Levantamiento

CANTIDAD DE AREA	
Piso 1	1510,26 m <sup>2</sup>
Doble altura a PB	889,66 m <sup>2</sup>
Doble altura Ingresos 0114,11 m <sup>2</sup>	
Area Total del Piso: 2514,03 m <sup>2</sup>	



LAVORA	11150	FECHA	11/11/00
REVISOR	JOM - JAM	PROYECTISTA	DOUGLAS 2000
ESCALA	1/50	PROYECTO	LP1/4
ING - FILL		CONTENIDO	Piso 1
LAVORA		PROYECTISTA	DOUGLAS 2000



Piso 1

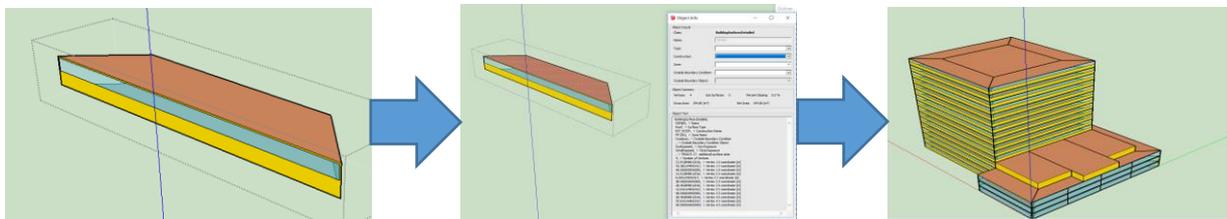


# APÉNDICE B

## MODELAMIENTO ENERGÉTICO

### Elaboración de la geometría

En el programa Sketch Up mediante el plugin de Trnsys 3D se elabora la geometría principal siguiendo los planos del ANEXO A y se indica las condiciones de adyacencia, el tipo de construcción que es y qué zonas térmicas adyacentes tiene como se aprecia en la secuencia de figura.



Construcción del modelo sketch up.

### Determinación de las cargas internas del edificio

Para determinar las cargas en las distintas zonas térmicas se procede a calcular dentro de cada zona la relación de área entre el espacio dedicado para aquel espacio con el área total de la zona térmica, haciendo esto se obtiene valores porcentuales de cada zona. Ejemplo el piso 4 en la zona térmica A2.

Area	Piso 4 zona A2
Oficina	75%
Baño	1%
Sala de juntas	9%
No Acondicionado	10%
Comedor	0%
Auditorio	0%
Atreo auditorio	0%
Pasillo	5%
Escaleras	0%
Cuarto electrico	0%
TOTAL	100%

### **Carga de iluminación y por equipos**

Se multiplica el valor porcentual por el área de la zona térmica y los valores de densidad de iluminación y de los equipos descritos en las tablas 2.4 y 2.5 respectivamente.

### **Iluminación**

$$ILP4A2 = ((0.75 * 11.84) + (0.01 * 9.69) + (0.05 * 5.36) + (0.1 * 6.46)) * 191.86$$

$$ILP4A2 = 1469.83 \text{ W}$$

### **Carga por ocupancia**

Usando los valores de la tabla 2.3 se estima por medio de los datos de ASHRAE el calor latente y sensible suponiendo que el trabajo es ligero se tiene 110 W en total por persona, para estimar el número de personas por zona se realizó la misma estimación de área tomando que el número de personas totales en un piso es igual al porcentaje del área de la zona multiplicado para el promedio general.

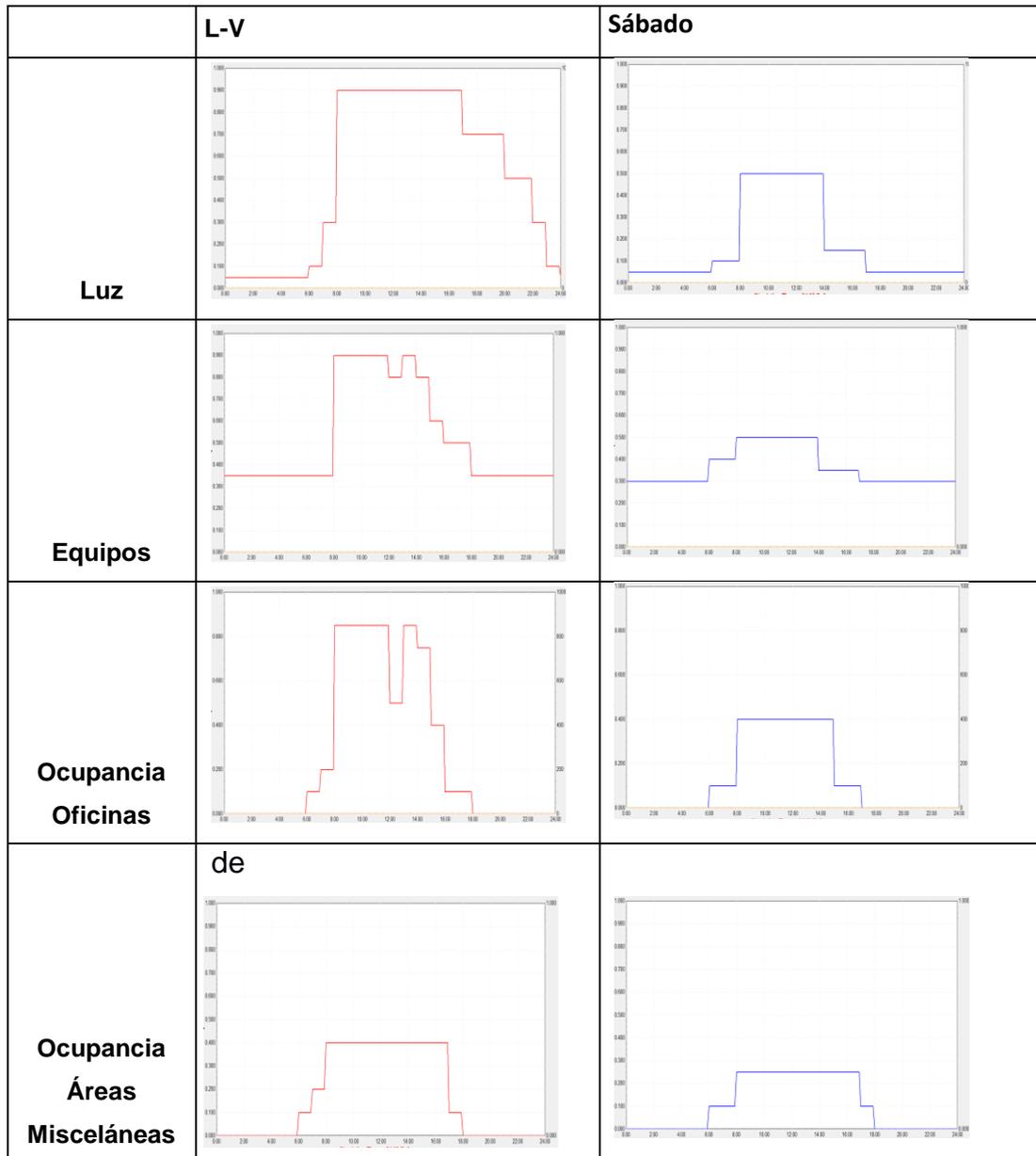
Ejemplo:

La zona térmica A2 del piso 4 ocupa el 14.8% del área total por lo que el número de personas que están en aquel lugar es igual a:

$$OcupanciaP4AX = 0.148 * 108 = 15.98 \text{ personas}$$

### **Calculo de carga horaria**

La carga de las diferentes zonas será por lo tanto la carga calculado por el perfil de uso que se puede observar en la tabla aladaña.

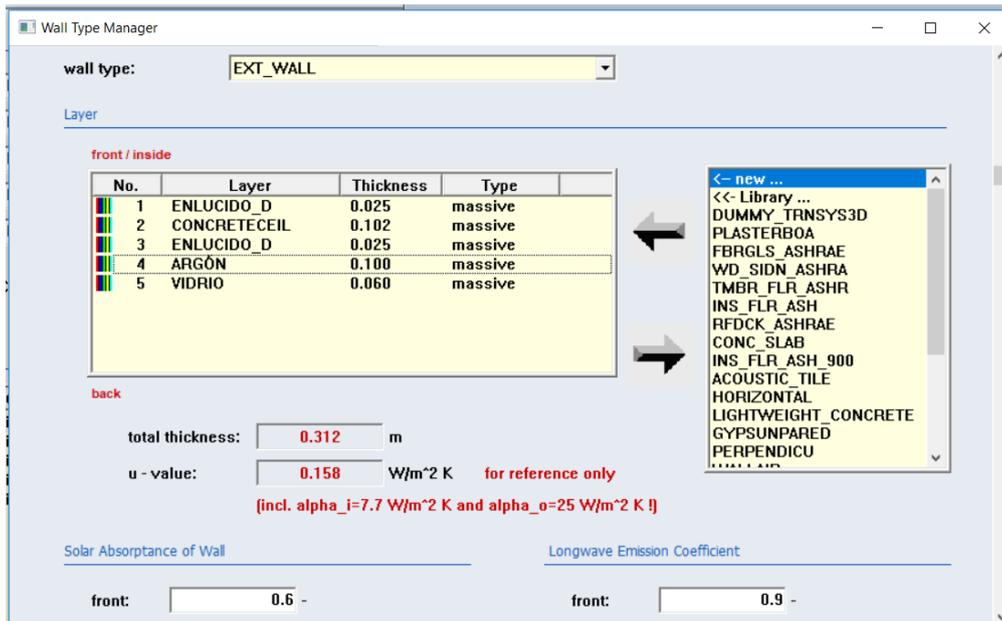


Perfil horario

## Definición de propiedades de la envolvente

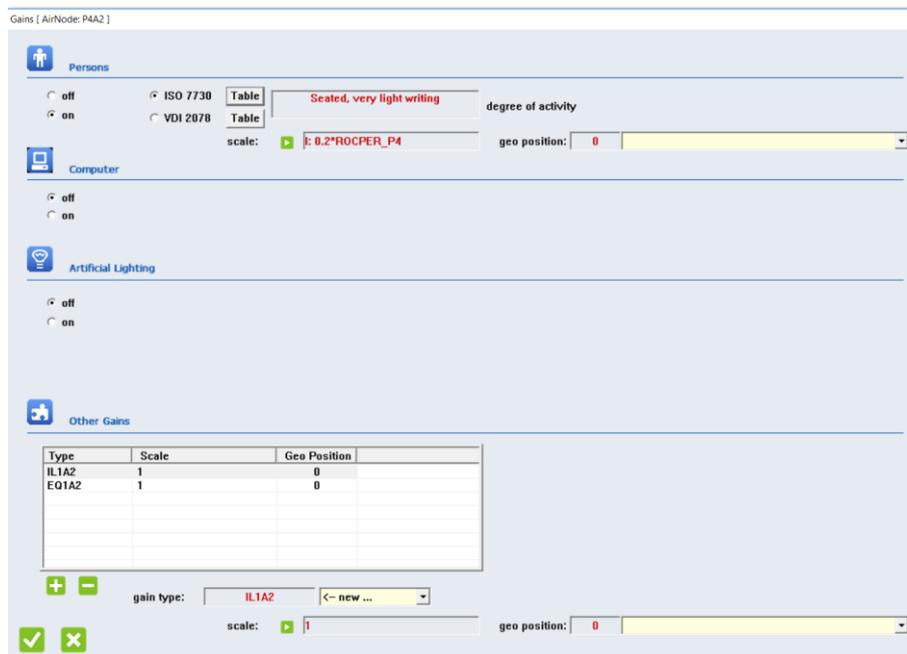
### Propiedades de los materiales

La definición de los diferentes materiales que conforman parte del modelo se realiza en la aplicación de TRNBuild, usando de referencia los materiales detallados por Sánchez y Erazo en su descripción del gobierno del litoral se especifica los materiales para el tipo de construcción como se observa en la figura siguiente.



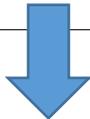
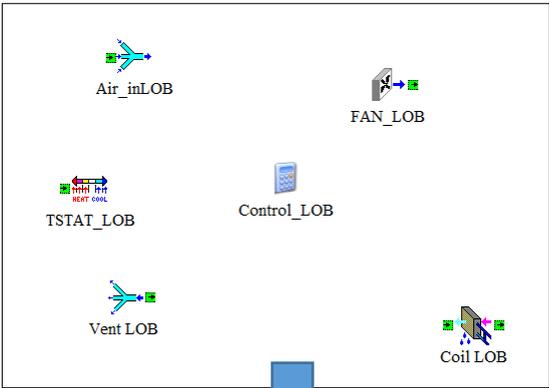
**Definición de superficies**

Las condiciones de calculo del coeficiente convectivo se detallan ahí mismo, para superficies externas el coeficiente convectivo se calculo mediante la aproximacion de McAddams como se especifico en el capitulo 2. Las ganancias del edificio se especifican en cada zona de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente en la aplicación de TRNbuild.

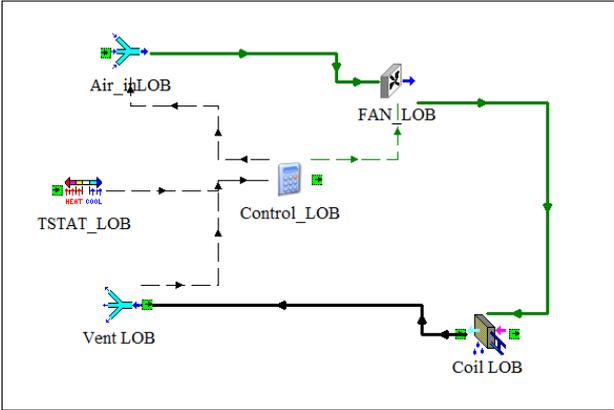


**Definición de carga en las diferntes zonas termicas.**

El sistema de climatización de cada piso consta de dos manejadoras de aire como se detallo en la metodología, para el modelamiento de esto se detalla sus principales componentes y para sus parametros de funcionamiento se usan los datos del catalogo correspondientes. Para modelar la manejadora de aire se detalla los ductos de retorno de aire, un ventilador, termostasto, el control de os diferentes equipos y el serpentín intercambiador de calor, posterior se realiza las conexiones respectivas entre los componentes como se aprecia en la siguiente figura.



Outlet Air Temperature	Inlet Air Temperature	20.0
Outlet Air Humidity Ratio	Inlet Air Humidity Ratio	0.008
Outlet Air % Relative Humidity	Inlet Air % Relative Humidity	50.
Outlet Air Flowrate	Air Flowrate	2000.0
Outlet Air Pressure	Inlet Air Pressure	1.
Condensate Temperature	Control Signal	1.0
Condensate Flowrate	Air-Side Pressure Increase	0.0

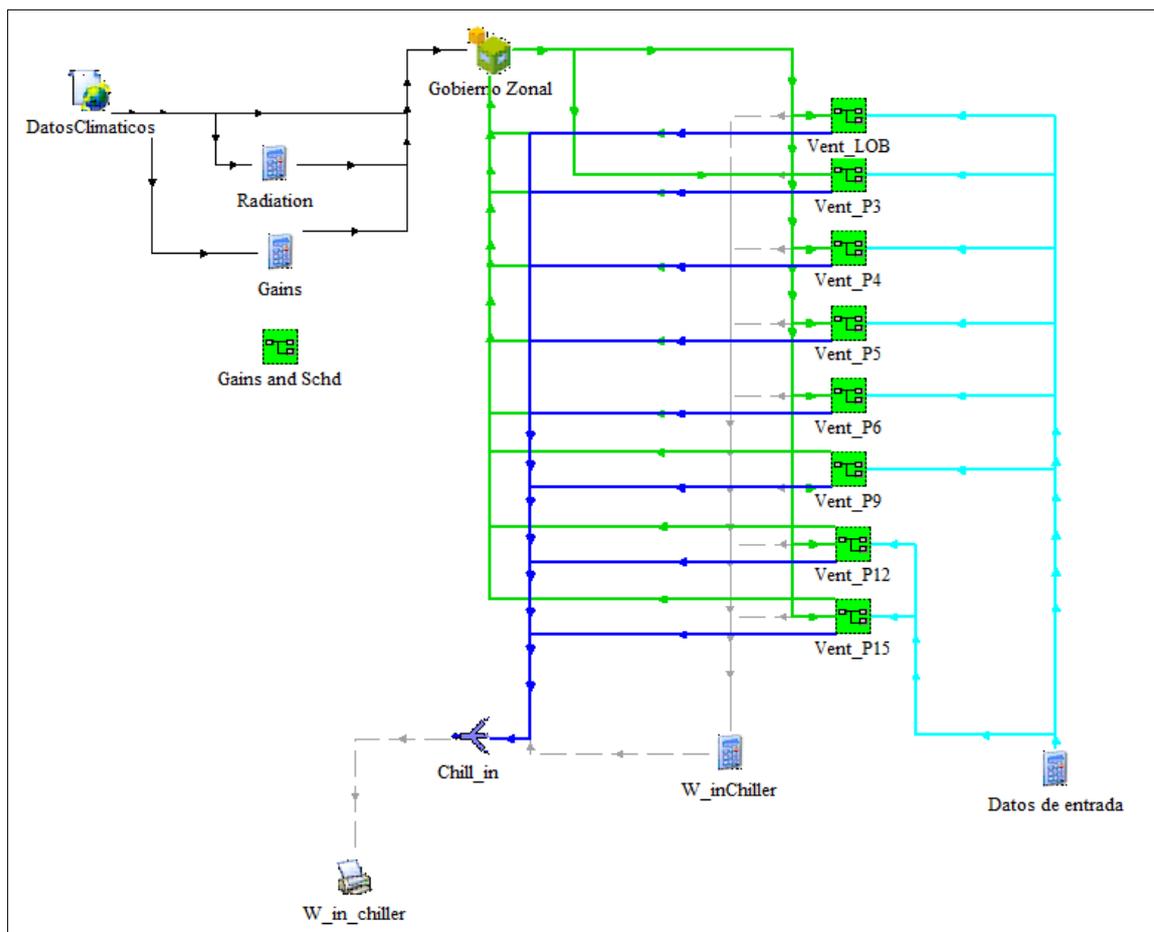


**Secuencia elaboracion manejadora de aire (UMA).**

## Esquema línea base

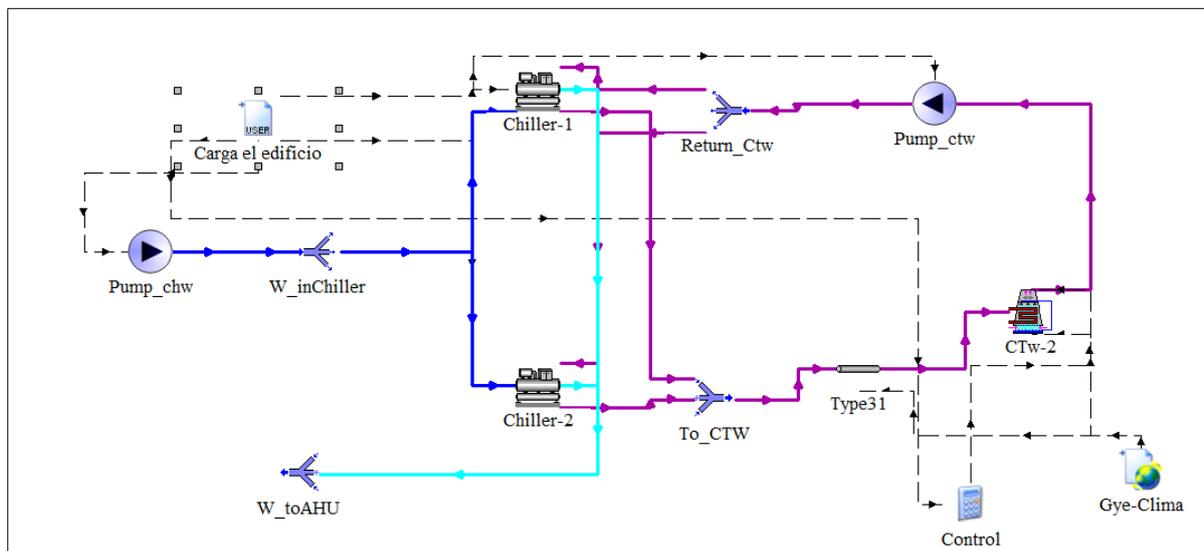
La elaboración del sistema de TRNSYS se puede apreciar en la figura de abajo donde el icono VENT\_LOB especifica la manejadora de aire, las conexiones verdes indican las conexiones de aire entre el módulo y la manejadora, el color azul es el agua de retorno al chiller mientras que el celeste representa el agua helada que ingresa a las manejadoras. Se presentan dos bloques de ecuaciones en la primera se detalla la corrección del ángulo azimut y se especifica la ecuación del coeficiente convectivo mientras que en el segundo bloque de ganancias se especifican las ganancias anteriormente descritas. El macro de "Gains and Schd" especifica los perfiles horarios respectivos de carga.

## Ventilación y edificio



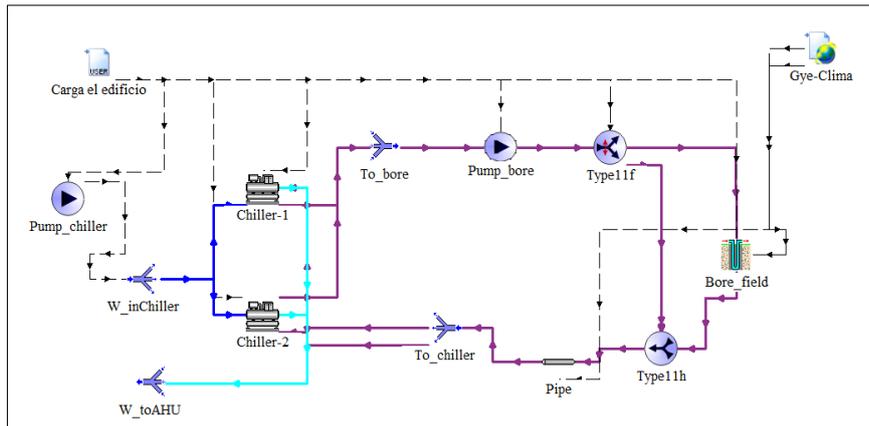
## Línea base torre de enfriamiento

Una vez obtenido los datos de agua ingreso se decidió dividir en dos secciones el sistema con el fin de reducir el tiempo de computo requerido para las simulaciones, para el sistema que representa las torres de enfriamiento y el chiller se importa los valores de temperatura de retorno de las manejadoras y se especifican los flujos de agua entre el edificio y las manejadoras y el sistema de bombeo de la manejadora a la torre de enfriamiento, como se aprecia en la figura de abajo. Para el control de la torre de enfriamiento se definió una temperatura deseada y se configuro el sistema con los parámetros del fabricante.



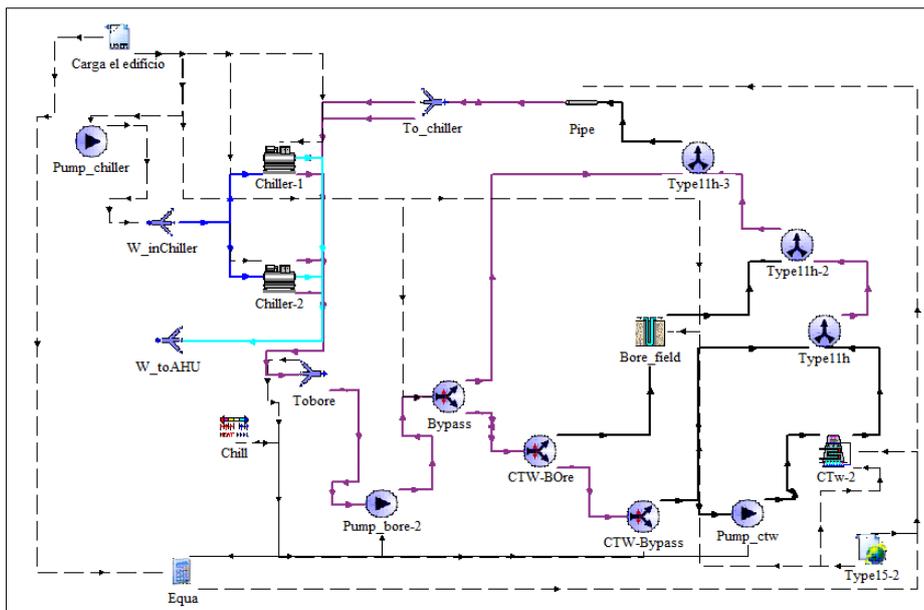
## Sistema geotérmico

El esquema del sistema geotérmico se puede apreciar en la figura donde se realiza un bypass del sistema geotérmico para regular la temperatura de entrada a los chiller, como se aprecia la figura. En este modelo se reemplaza en su totalidad la torre por el sistema geotérmico.



## Sistema híbrido

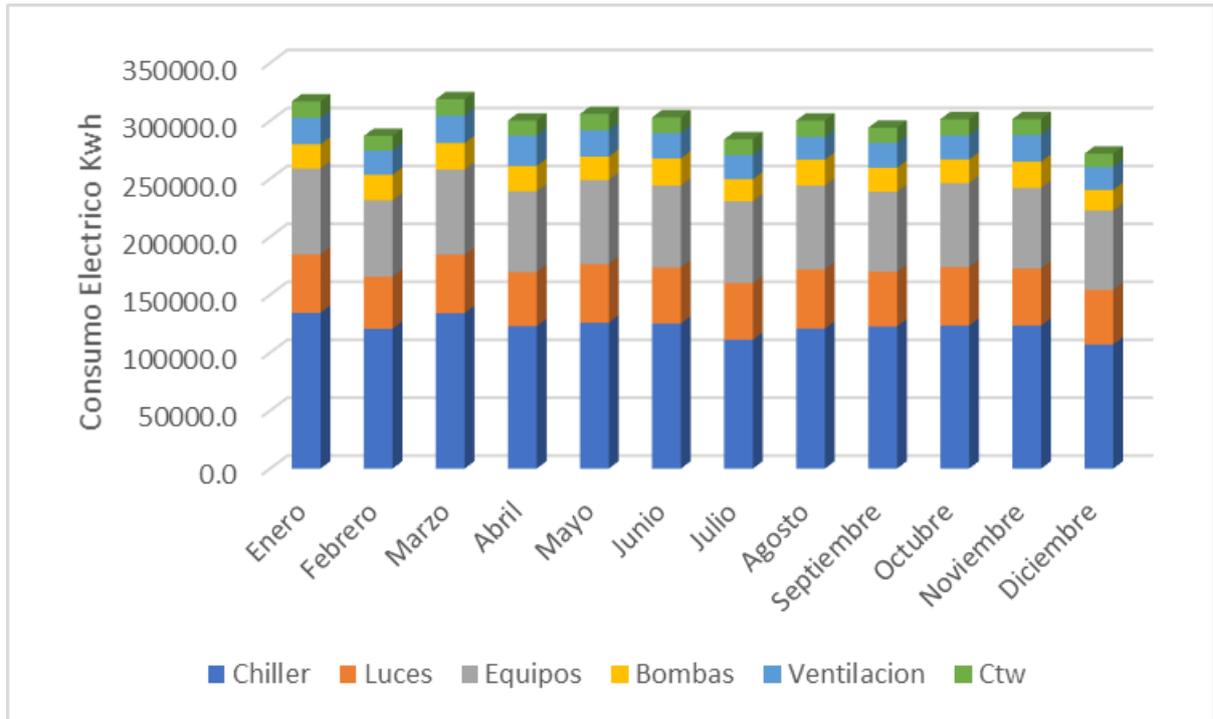
El sistema híbrido se agrega una torre de enfriamiento en paralelo como se aprecia a la figura y se realizan los bypass respectivos dependiendo de qué porcentaje térmico está diseñado el sistema.



# APÉNDICE C

## GRÁFICAS LÍNEA BASE

### Consumo detallado



# APÉNDICE D

## CÁLCULOS DE INTERCAMBIADOR Y BOMBA DE RECIRCULACIÓN

### Cálculos representativos de intercambiador geotérmico

Los presentes cálculos son para el intercambiador geotérmico a un tercio de la carga (33%).

Conociendo las resistencias del suelo, tubos y relleno; y las temperaturas a la cual se desea operar el intercambiador de calor se realiza el reemplazo de valores en la ecuación 2.2.

$$L_c = \frac{2.10 * 10^{-6} \frac{Btu}{h} * \left( \frac{12.67 + 3.412}{12.67} \right) * (0.26 + 0.061 + 0.59 * 1)}{\left( \frac{95 + 113}{2} - 79.7 \right) ^\circ F} * BM$$

$$L_c = 99750 \text{ ft} * BM$$

Para conocer el valor de BM se aplica la ecuación 2.8 para encontrar el NNAGL.

Las horas de funcionamiento del equipo en el año se consideró conociendo que el equipo trabaja 12 horas al día, durante 6 días de la semana.

$$NNAGL = \frac{2.10 * 10^{-6} \frac{Btu}{h} * 3756 \text{ h}}{99750 \text{ ft} * \left( \left( \frac{113 - 95}{2} \right) - 79.7 \right) ^\circ F}$$

$$NNAGL = 892 \frac{Btu}{\text{ft} ^\circ F}$$

Seleccionando una separación entre agujeros de 20 ft (6m), se procede a obtener los valores de BM para el  $k_g$  del suelo de las gráficas de esta sección. En este caso se

necesitó realizar una interpolación para la conductividad térmica de la ciudad de Guayaquil  $k_g = 0.964 \frac{Btu}{h ft °F}$ .

Kg	0.7	0.964	1.3
BM	1.07	1.06	1.05

Obteniendo así la longitud requerida de perforación corregida.

$$L_c = 99750 ft * 1.06 = 105855 ft$$

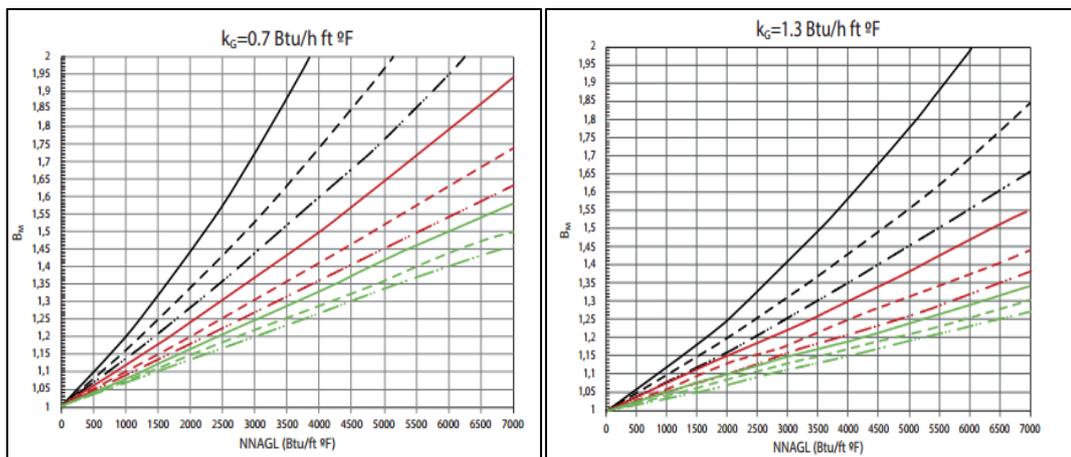
La profundidad de los agujeros se especificó en 320 ft (100 m) para evitar efectos de sifonamiento en los agujeros al momento de perforar.

La cantidad de agujeros que se requiere se determinó por medio de la ecuación 2.3.

$$NB = \frac{105855}{320} \cong 330$$

Esta cantidad de agujeros se la definió en realizar en una matriz de 21 filas con 16 agujeros.

Los cálculos se repitieron para la carga a 50%. Obteniendo para este caso una cantidad de 496 agujeros, realizándola en una matriz de agujeros de (31 filas con 16 agujeros).



## Leyenda de las gráficas

·· ···	1 fila - 25'
---	2 filas - 25'
—	3 filas - 25'
·· ···	1 fila - 20'
---	2 filas - 20'
—	3 filas - 20'
·· ···	1 fila - 15'
---	2 filas - 15'
—	3 filas - 15'

## Cálculos representativos para selección de bomba

Como se observa en la figura representativa del circuito de agua por el cual pasa el fluido, se consideró el tramo más largo para realizar las mediciones de pérdidas de cabezal por fricción y de accesorios. Siendo el tramo más largo la distancia desde la entrada del flujo hacia el último agujero más alejado de la entrada, representada por la línea roja, luego por el tramo de la tubería en U del agujero, pasando finalmente a la tubería de retorno representada por la línea celeste.

Tomando como ejemplo de cálculo la tubería de distribución y carga del 33% se presentan los siguientes cálculos. El flujo por agujero se dio por:

$$\frac{\text{flujo}}{\text{bore}} = \frac{300}{16} \cong 0.90 \frac{\text{GPM}}{\text{bore}}$$

El número de Reynolds se lo determinó mediante la ecuación 2.11.

$$Re_D = 4 * \frac{0.90}{\pi * \frac{1.34}{12} * 8.639 * 10^{-6}} = 29140$$

Indicando que el flujo es turbulento.

La rugosidad relativa de la tubería se determinó mediante la relación entre la rugosidad característica propia de la manguera con respecto al diámetro.

$$\frac{e}{D} = 0.00043$$

Para la determinación del factor de fricción se aplicó la ecuación 2.10. Encontrando primero los coeficientes A y B.

$$A = \left[ 2.457 * \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{29140} \right)^{0.9} + 0.27 * (0.00043)} \right) \right]^{16} = 1.169 * 10^{20}$$

$$B = \left( \frac{37530}{29140} \right)^{16} = 57.29$$

$$f = 8 * \left[ \left( \frac{8}{29140} \right)^{12} + \left( \frac{1}{(1.169 * 10^{20} + 57.29)^{1.5}} \right) \right]^{\frac{1}{12}} = 0.0248$$

La longitud de la tubería de distribución como se consideró al inicio tiene una distancia de 550 ft desde la entrada hasta la perforación más lejana.

Con estos valores encontrados, se procede al cálculo de la pérdida de cabezal con la ecuación 2.9.

$$h_l = 0.0248 * \left( \frac{550 ft}{\frac{1.94}{12} ft} \right) \left( \frac{1.6^2 \frac{ft^2}{s^2}}{2 * 32.2 \frac{ft}{s^2}} \right) = 3.178 ft$$

En la presente tabla, se encuentran los resultados para los otros tramos de tuberías.

Tuberías	DI (in)	Reynolds	e/D	Velocidad (ft/s)	A	B	f	Longitud (ft)	$\Delta h_{fricción}$ (ft)
De distribución	1.94	29140	0.000433	1.557	1.16934E+20	57.297	0.0248	550	3.18
De retorno	1.94	29140	0.000433	1.557	1.16934E+20	57.297	0.0248	890	5.14
Por agujero	1.36	41568	0.000618	3.169	1.6684E+20	0.195	0.0237	640	20.89
Total									29.21

El cálculo de pérdidas menores se realizó con la ecuación 2.12. Para lo cual se consideraron los siguientes accesorios con sus respectivos coeficientes según lo estipulado en el catálogo de la compañía "Tigres".

Accesorios	Km
Tee recta	0.3
Codo	0.75

Se realiza el cálculo de pérdidas menores de la tubería de distribución como representación. En esta tubería se contemplaron 34 “Tees” para la distribución hacia los pozos y 1 codo para la conexión del último pozo.

$$h_m = \frac{((34 * 0.3) + (1 * 0.75)) * \left(1.6 \frac{ft}{s}\right)^2}{2 * 32.2 \frac{ft}{s^2}} = 0.412$$

Se presenta a continuación los resultados para los tramos de tubería.

Tuberías	DI (in)	Tees	Codos	Σkm	Vel (ft/s)	Δh_min (ft)
De distribución	1.94	34	1	10.95	1.557	0.412
De retorno	1.94	16	1	5.55	1.557	0.209
Total de perdidas menores						0.621

La sumatoria de estas pérdidas se la realiza, obteniendo de esta forma la pérdida total del circuito de tuberías. A esta pérdida total se le considera un adicional de 20% por accesorios no considerados.

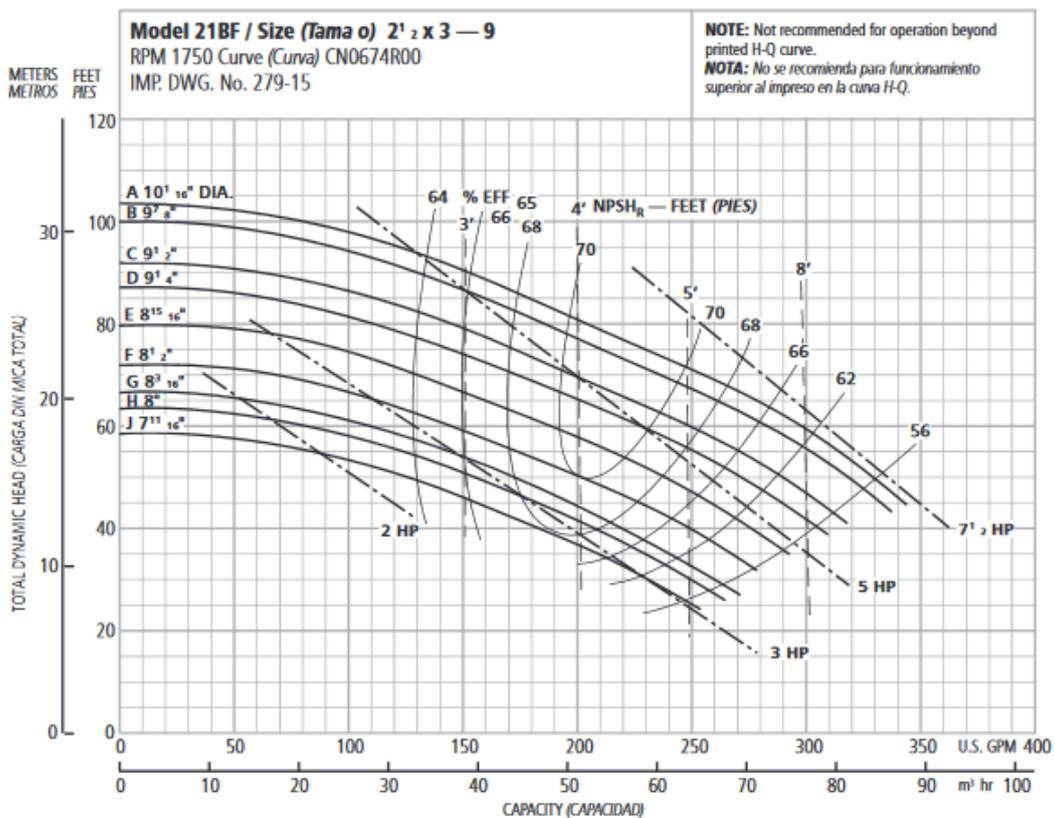
$$\Delta h_{total} = (29.21 + 0.62) * 1.20 = 36 \text{ ft}$$

Conociendo las pérdidas y el caudal con el que deberían trabajar se realiza interpolaciones de estos valores para obtener las pérdidas con otros caudales con la relación 2.13. A continuación se obtiene la siguiente tabla, con la cual se elabora la curva del sistema.

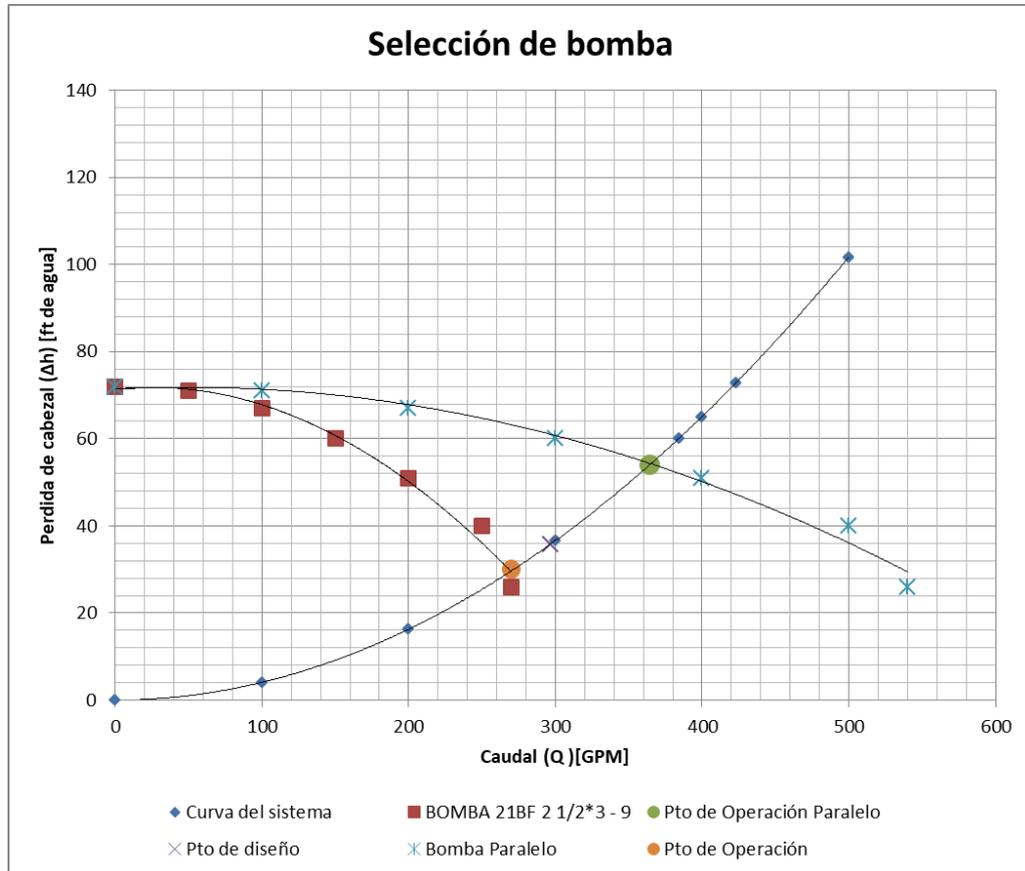
Curva del sistema			
Q (GPM)	H (m)	Q (GPM)	H (ft)
0	0	0	0
100	1	100	4
200	5	200	16
300	11	300	37
384	18	384	60
400	20	400	65
423	22	423	73
500	31	500	102

En los catálogos de bombas de los distribuidores del país se busca aquella que pueda cumplir con el punto de diseño requerido (298 GPM y 36 ft).

Para este caso se consideró la bomba 21F 2 ½ x3-9 con impulsor F, del grupo Goulds Water Technology. la curva de esta bomba se presenta a continuación.



Considerando un sistema de bombeo en paralelo, se requirió contemplar la intersección entre la curva del fabricante y del sistema. Como se muestra en la siguiente gráfica.



El punto de operación de esta bomba es 364 gpm y 54 ft con una eficiencia de 0.65, al cual se le calcula la potencia de bombeo, potencia mecánica y eficiencia mecánica.

$$W_{pump} = \frac{(364 \text{ (gpm)}) * 54 \text{ (ft)}}{3960 * 0.65} = 7.6 \text{ HP}$$

La potencia mecánica está dada por la potencia del motor, al ser un sistema en paralelo, las potencias se suman.

$$W_{motor} = 10 \text{ HP}$$

La eficiencia mecánica del sistema es la presente.

$$Ef. Mecánica = \frac{W_{pump}}{W_{motor}} = 0.76$$

### NPSH disponible

El cálculo de este, se lo realiza por medio de la siguiente ecuación (Martín, 2012).

$$NPSH_d = z + \frac{V^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g}$$

Ubicando la bomba a un nivel de 8 ft debajo de la línea de retorno y con una presión de vapor de agua a 98 °F de 47.07 mmHg. El NPSH disponible es el siguiente:

$$NPSH_d = \left( 8 \text{ ft} * 0.3048 \frac{\text{m}}{\text{ft}} \right) + \frac{\left( 1.6 \frac{\text{ft}}{\text{s}} * 0.3048 \frac{\text{m}}{\text{ft}} \right)^2}{2 * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - \frac{47.07 \text{ mmHg} * 0.133322 \frac{\text{kPa}}{\text{mmHg}}}{998 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

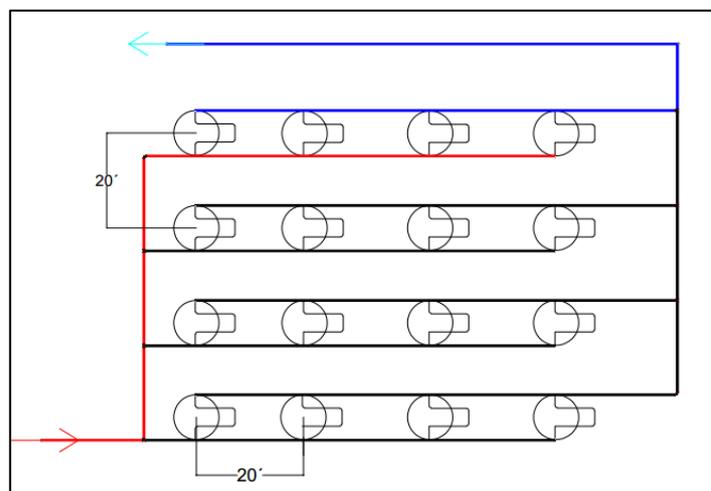
$$NPSH_d = 2.51 \text{ m} = 8.23 \text{ ft}$$

El requerido por la bomba en el punto de operación es de 8 ft.

$$NPSH_r < NPSH_d$$

Indicando que la bomba no cavitará.

### Esquema del circuito de tuberías.



# APÉNDICE E

## DETERMINACIÓN DE COSTOS

### Costos generales

La inversión que requiere el sistema geotérmico se basa en tres principales aspectos. Los costos de materiales de relleno, de tuberías y accesorios; y el de mano de obra, perforación y maquinaria. Los cálculos a continuación son para la carga a 33%.

### Costos de tubería y accesorios

Se realizaron cotizaciones tanto de tuberías y accesorios dentro del mercado local, como lo es la empresa "Termocruz". Esta se representa en la siguiente tabla.

Descripción	Costo unitario (\$)
Manguera PE 2'' (4m)	25.85
Manguera PE 1 1/4'' (4m)	10.64
Codo 90	5.34
Tee	9.13

La longitud de manguera de HDPE de 2'' se definió tanto por la cantidad de filas de la matriz del circuito por la suma de la longitud de distribución y de retorno.

$$L_{2''} = 21 * (550 + 890)ft * \frac{0.3048 m}{1 ft} = 9220 m$$

La longitud de manguera de HDPE de 1 1/4'' se definió por la cantidad de agujeros y el ida y vuelta de la profundidad del agujero.

$$L_{1\frac{1}{4}''} = 2 * 100 (m) * 331 = 20165 m$$

Para conocer las unidades requeridas se divide esta longitud para la que el distribuidor la vende, en este caso para 4.

Los accesorios lo venden por unidad. El costo total de tubería y codos se presenta en la siguiente tabla.

<b>Costo de tuberías y accesorios</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Costo unitario (\$)</b>	<b>Unidades</b>	<b>Costo total (\$)</b>
Manguera PE 2'' (4m)	25.85	2304	\$59,565.84
Manguera PE 1 1/4'' (4m)	10.64	16540	\$175,983.37
Codo 90	5.34	42	\$7,625.52
Tee	9.13	1428	\$13,037.64
Total			\$256,212.38

### Costos de materiales

Con la finalidad de obtener el gasto generado por el consumo de los materiales para el relleno se procedió a determinar la cantidad requerida que ocupará cada material para una perforación. Por lo cual se determinó la diferencia entre la perforación y el tubo en U mediante el cálculo volumétrico de estos.

$$V_{relleno} = V_{perforación} - V_{tuboU}$$

$$V_{relleno} = \frac{\pi * \frac{5^2}{12} * 100}{4} - 2 * \frac{\pi * \frac{1.33^2}{12} * 100}{4} = 43.63 - (2 * 2.73) = 38.18$$

Conociendo las proporciones de los materiales estipulados en la tabla 2.14, se determinó el peso requerido al multiplicarlo por el volumen a llenar.

<b>Solidos</b>	<b>Kg/m3</b>	<b>Kg</b>
Cemento	587.7	635.4
Arena	1251.8	1353.3
Bentonita	6.5	7.0
<b>Líquidos</b>	<b>l/m3</b>	<b>Litros</b>
Plastificante	8.8	9.5
Agua	323.3	349.5

Se cotizó precios de estos materiales en el mercado local, como “Disensa” y demás locales. Estos tienen un precio promedio por sacos de pesos. Obteniendo de esta manera un costo de estos materiales para llenar la totalidad de agujeros, 331.

El agua tiene un costo para cada 15 m<sup>3</sup> como lo estipula la tarifa de (Interagua, 2019).

0- 15	\$ 0,322
16- 30	\$ 0,477
31 - 60	\$ 0,675
61 - 100	\$ 0,888
101 - 300	\$ 1,001
301 - 2500	\$ 1,604
2501 - 5000	\$ 2,085
5001 o más	\$ 3,487

Adicional se cobra un 80% al valor de agua por tema de alcantarillado.

Se consume una cantidad de 116m<sup>3</sup> de su equivalente de litros de agua, para la totalidad de agujeros a rellenar.

Material	Precio Unitario (\$)	Unidades	Costo Total (\$)
Cemento (50Kg)	8.06	4204	\$33,880.54
Arena (50 Kg)	0.93	8954	\$8,326.79
Bentonita (22.6 Kg)	21.00	1064	\$22,341.11
Plastificante (10Kg)	20.08	323	\$6,493.13
Agua (1 m <sup>3</sup> )	0.74	116	\$85.82
Total			\$71,127.39

### **Costos de maquinaria, perforación y mano de obra.**

El valor de la mano de obra se lo fijo en el sueldo básico actual del Ecuador teniendo un valor de \$380 aproximadamente por 6 meses de duración de trabajo. Los salarios de los ingenieros de obra se estimaron en \$2000. Para la elaboración de los trabajos, se requiere de la compra de máquinas de electro fusión, que tienen un costo de \$650 de exportación. La bomba de agua se cotizó en el grupo “La llave”, donde el precio de la bomba requerida redondea los \$2500.

El costo de perforación se lo tomo como referencia de un trabajo realizado en la Base Naval Sur, donde se realizaron perforaciones para la elaboración de pozos

geotérmicos. Este tuvo costo de \$120 por metro, debido que también retirarían el núcleo del suelo para otros estudios. Para la elaboración de cálculos se consideró este valor como tal. Obteniendo de esta manera la siguiente tabla de costos.

Descripción	Precio Unitario (\$)	Unidades	Costo Total (\$)
Perforación y relleno	12000	331	\$3,969,549.78
Máquina de electro-fusión	650	3	\$1,950.00
Mano de Obra	2280	8	\$18,240.00
Ingeniero de Obra	12000	2	\$24,000.00
Bomba de agua	2500	3	\$7,500.00
Total			\$4,021,239.78

Dando una inversión final para la elaboración de una matriz de (21x16) para la carga a 33% de \$4, 348,579.55.

Inversión	
Costo de tuberías y accesorio	\$256,212.38
Costo de materiales relleno	\$71,127.39
Costo de maquinaria, perforación y mano de obra	\$4,021,239.78
Total inversión	\$4,348,579.55

### Costos de operación

Los costos de operación se basan principalmente en el consumo eléctrico por los componentes del sistema, como lo son las bombas y ventiladores. También se tomó en consideración el consumo de agua para la operación, en este caso particularmente para las torres de refrigeración.

El cálculo de consumo de agua se basó en la misma tarifa del caso para los materiales. El volumen que consume la torre es por evaporación y arrastre. Estas relaciones se las encuentra en (Tecnoequip C.A., 2004). Los cálculos representativos son para una carga de 100% con 6 días a la semana de operación. El flujo en la torre de enfriamiento es de 990 gpm para la carga de 100%.

$$V_{\text{evaporación}} = \text{gpm} * \Delta T * h * 0.00023 = 990 * 10 * 12 * 0.00023 = 27.32 \frac{m^3}{\text{día}}$$

$$V_{arrastrre} = gpm * 0.00011 = 990 * 0.00011 = 0.0968 \frac{m^3}{día}$$

$$V_{anual} = (27.32 + 0.0968) * 313 \text{ días} = 7632 m^3$$

El desglose de los valores a pagar por cada 15 m3 es el siguiente.

Volumen	Tarifa	Costo / rango
15	0.322	4.83
15	0.477	7.155
30	0.675	20.25
40	0.888	35.52
200	1.001	200.2
2200	1.604	3528.8
2500	2.085	5212.5
2632	3.487	9179.3
7632.44	total	18188.6

El consumo eléctrico por bomba y ventilador para la carga al 100% se encuentra en la Tabla 3.11, el costo de este será calculado por medió del consumo de energía anual de ambos equipos y otorgándole un valor de \$0,12 kWh; valor sin subsidio. Otro costo de operación es el mantenimiento básico de los equipos como bomba y ventilador. Para este rubro se consultaron valores locales. En las siguientes tablas se encuentran los costos operacionales para cada sistema.

Para el sistema geotérmico

Sistema Geotérmico			
Descripción	Costo Unitario (\$)	Consumo anual	Costo Total Anual (\$)
Consumo Energía Eléctrica	\$0.12	62338.70	\$7,480.64
Mantenimiento básico	\$15	4	\$46.08
Total			\$7,526.72

Para el sistema híbrido

Torre de Enfriamiento			
Descripción	Costo Unitario (\$)	Consumo anual	Costo Total Anual (\$)
Consumo Energía Eléctrica	\$0.12	232118	\$27,854.18
Consumo de Agua	\$4.29	7632	\$32,739.45
Mantenimiento básico	\$138.00	2	\$276.00
Total			\$60,869.63

Se calcula de la misma forma para los sistemas híbridos.

Para este cálculo se consideró el sistema (GSHP 67% - CT 33%) donde el flujo de agua del GSHP es de 660 gpm, mientras que para CT el respectivo complemento de 330 gpm.

$$V_{\text{evaporación}} = 9.10 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{arrastre}} = 0.0363 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{anual}} = 2862 \text{ m}^3$$

El costo operativo para este sistema será la suma de los costos operativos individuales del GSHP y CT. El consumo anual de cada sistema se visualiza tanto en la figura 3.5 como en la tabla de consumo energético ubicado al final de este APÉNDICE.

Gastos operativos para un sistema de intercambiadores geotérmicos verticales.

Sistema Geotérmico			
Descripción	Costo Unitario (\$)	Consumo anual	Costo Total Anual (\$)
Consumo energía eléctrica	\$0.12	27342.00	\$3,281.04
Limpieza e inspección de bomba	\$15.00	4	\$60.00
Total			\$3,341.04

## Gastos operativos para la torre de enfriamiento

Torre de Enfriamiento			
Descripción	Costo unitario (\$)	Consumo anual	Costo total anual (\$)
Consumo energía eléctrica	\$0.12	57008	\$6,840.96
Consumo de agua	\$2.86	2862	\$8,185.32
Limpieza e inspección de bomba	\$138.00	2	\$276.00
Total			\$15,302.28

El procedimiento se repite para los demás sistemas con diferentes cargas. Donde el flujo de agua a la torre se reduce en proporción a la carga de la torre.

	GSHP 67% - Torre 33%			GSHP 50% - Torre 50%			GSHP 33% - Torre 67%		
Meses	Chiller [kWh]	Bomba GSHP [kWh]	Ventilador Torre [kWh]	Chiller [kWh]	Bomba GSHP [kWh]	Ventilador Torre [kWh]	Chiller [kWh]	Bomba GSHP [kWh]	Ventilador Torre [kWh]
Enero	142076	2365	3436	141301	2294	5434	142790	1892	6014
Febrero	131626	2076	3735	131456	2014	4775	132338	1661	5969
Marzo	147233	2365	4084	146733	2294	5440	147819	1892	6588
Abril	140598	2175	4418	140673	2110	5003	141301	1740	6551
Mayo	144921	2385	4173	144990	2313	5485	145386	1908	6428
Junio	148299	2309	4898	148408	2239	5310	148759	1847	6894
Julio	130795	2271	4075	130997	2203	5223	131254	1817	5854
Agosto	146547	2374	5205	146797	2302	5459	146857	1899	7028
Septiembre	153997	2189	6998	154744	2123	5034	154219	1751	8591
Octubre	149510	2365	5715	149576	2294	5439	149878	1892	7196
Noviembre	147992	2288	6025	148224	2219	5262	148438	1830	7263
Diciembre	122471	2181	4248	122540	2116	5017	122594	1745	5675
Consumo anual	1706064	27342	57008	1706438	26521	62880	1711634	21873	80052
Consumo Total	1790414			1795840			1813559		
		Ahorro	101471		Ahorro	96045		Ahorro	78326

# APÉNDICE F

## AMORTIZACIÓN

### Amortización simple

Para determinar el periodo de tiempo para el cual el sobrecoste de la instalación queda compensado, se realiza una amortización simple.

La amortización simple considera el costo de inversión inicial entre ambos sistemas y sus gastos operativos.

$$Amortización_{simple} = \frac{CI_{sumidero} - CI_{torre}}{(CO)_{torre} - (CO)_{sumidero}}$$

El costo de inversión para una torre de enfriamiento se basó en el costo de la torre más un porcentaje de 10% por instalación, equipos y materiales no contemplados. El costo de la torre se cotizó para una carga de 475 TON, debido que, para una carga definida de sistema geotérmico, la carga de la torre debe ser aproximadamente el doble. (Hackel).

Para comparar con las demás cargas se realizó una relación de precios por falta de información de estas torres. Los costos de inversión y de operación se pueden visualizar en la tabla 3.14 y tabla 3.16 respectivamente. Considerando los valores para una carga del 100% como se muestra en la tabla a continuación, se tiene un tiempo de amortización de 225 años. Se debe recordar que el edificio trabaja con dos torres, por lo cual se duplica el costo de la inversión de la torre.

Carga (100%)	Torre enfriamiento	Sumidero geotérmico
Costo inversión (CI)	\$256,774.74	\$13,045,738.66
Gasto Operativo	\$60,869.61	\$7,540.68

$$Amortización_{simple} = \frac{\$13,045,738.66 - \$256,774.74}{\$60,869.61 - \$7,540.68} = 240 \text{ años}$$

Para los sistemas híbridos, los costos de inversión y gastos se evalúan a continuación.  
(GSHP 67% - CT 33%)

$$Amortización_{simple} = \frac{\$8,743,359.10 - \$256,774.74}{\$60,869.61 - \$18,643.32} = 201 \text{ años}$$

(GSHP 50% - CT 50%)

$$Amortización_{simple} = \frac{\$6,587,142.47 - \$256,774.74}{\$60,869.61 - \$22,991.55} = 167 \text{ años}$$

(GSHP 33% - CT 67%)

$$Amortización_{simple} = \frac{\$4,436,116.39 - \$256,774.74}{\$60,869.61 - \$33,334.83} = 152 \text{ años}$$

# APÉNDICE G

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

### Variación de parámetros

Con la finalidad de conocer en qué condiciones se puede aplicar este tipo de sistemas, se procede a modificar ciertas variables y analizar cómo cambia el costo de instalación, debido que este es el valor más alto para la inversión en los GSHP.

### Variable 1. Precio de perforación

Si se considera precios internacionales para la perforación de agujeros, se disminuye considerablemente el costo de inversión. El rango de estos precios es entre 20 a 40 dólares por metro como lo estipula el libro (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

Variando el precio de perforación, se obtiene los siguientes valores de inversión de GSHP, de ahorro y amortización.

### Costo perforación: \$20/m

Sistema Geotérmico	Inversión GSHP	Inversión híbrido	Ahorro Operacional (\$)	Años Amortización
Carga Completa (100%)	\$3,121,864.21	NA	\$53,328.93	54
Carga al 67%	\$2,081,242.80	\$2,127,442.80	\$45,534.27	44
Carga al 50%	\$1,558,921.04	\$1,627,005.25	\$37,877.80	36
Carga al 33%	\$1,040,621.40	\$1,128,158.24	\$32,429.94	32

### Costo perforación: \$30/m

Sistema Geotérmico	Inversión GSHP	Inversión híbrido	Ahorro Operacional (\$)	Años Amortización
Carga Completa (100%)	\$4,114,251.65	NA	\$53,328.93	72
Carga al 67%	\$2,742,834.43	\$2,789,034.43	\$42,226.29	60
Carga al 50%	\$2,055,114.76	\$2,123,198.97	\$37,877.80	49
Carga al 33%	\$1,371,417.22	\$1,458,954.06	\$27,534.78	44

**Costo perforación: \$40/m**

<b>Sistema Geotérmico</b>	<b>Inversión GSHP</b>	<b>Inversión híbrido</b>	<b>Ahorro Operacional (\$)</b>	<b>Años Amortización</b>
Carga Completa (100%)	\$5,106,639.10	NA	\$53,328.93	91
Carga al 67%	\$3,404,426.06	\$3,450,626.06	\$42,226.29	76
Carga al 50%	\$2,551,308.48	\$2,619,392.69	\$37,878.05	62
Carga al 33%	\$1,702,213.03	\$1,789,749.87	\$27,534.78	56

### **Variable 2. Precio de kWh.**

Es normal que el precio del kWh tome variaciones, debido que este está sometido a regulaciones de ley y política del País. Es por esto que se considera la variación de este para visualizar como afecta al tiempo de amortización y el ahorro operacional en los equipos. Fijando el parámetro de precio de perforación en \$20 y variando el costo del kWh se tienen los siguientes valores.

**Precio: \$0.14/kWh**

<b>Sistema Geotérmico</b>	<b>Inversión GSHP</b>	<b>Inversión híbrido</b>	<b>Ahorro Operacional (\$)</b>	<b>Años Amortización</b>
Carga Completa (100%)	\$3,121,864.21	NA	\$56,724.51	51
Carga al 67%	\$2,081,242.80	\$2,127,442.80	\$45,181.65	41
Carga al 50%	\$1,558,921.04	\$1,627,005.25	\$40,732.39	34
Carga al 33%	\$1,040,621.40	\$1,128,158.24	\$30,138.64	29

**Precio: \$0.16/kWh**

<b>Sistema Geotérmico</b>	<b>Inversión GSHP</b>	<b>Inversión híbrido</b>	<b>Ahorro Operacional (\$)</b>	<b>Años Amortización</b>
Carga Completa (100%)	\$3,121,864.21	NA	\$60,120.09	48
Carga al 67%	\$2,081,242.80	\$2,127,442.80	\$48,137.01	39
Carga al 50%	\$1,558,921.04	\$1,627,005.25	\$43,586.72	31
Carga al 33%	\$1,040,621.40	\$1,128,158.24	\$32,742.50	27

**Precio: \$0.2/kWh**

<b>Sistema Geotérmico</b>	<b>Inversión GSHP</b>	<b>Inversión híbrido</b>	<b>Ahorro Operacional (\$)</b>	<b>Años Amortización</b>
Carga Completa (100%)	\$3,121,864.21	NA	\$66,911.25	43
Carga al 67%	\$2,081,242.80	\$2,127,442.80	\$54,047.73	35
Carga al 50%	\$1,558,921.04	\$1,627,005.25	\$49,295.39	28
Carga al 33%	\$1,040,621.40	\$1,128,158.24	\$37,950.22	23

### **Caso especial**

Si la ciudad de Guayaquil presentase una temperatura del suelo de 16 grados, las características del sistema disminuyen y a la par la necesidad del consumo energético en los sistemas.

Las perforaciones requeridas disminuyen para cada sistema geotérmico a las siguientes cantidades.

Porcentaje de Carga (%)	Longitud intercambiador (ft)	No de agujeros
100	317550	600
67	211700	400
50	158780	279
33	105850	200

Como se observa al variar la temperatura de 26.5°C a 16°C, las perforaciones requeridas se reducen en un 40% por sistema. Por lo cual para el precio de perforación a \$20 dólares, costo internacional, y con el costo de energía por kWh consumido de 0.12 kWh se obtiene una amortización de 17 años debido que el costo de operación en el chiller se ve reducido.

<b>Variable - Precio kWh</b>	<b>Sistema Geotérmico</b>	<b>Inversión GSHP</b>	<b>Ahorro Operacional (\$)</b>	<b>Años Amortización</b>
\$0.12	Carga Completa (100%)	\$1,952,090.94	\$100,200.80	17

# APÉNDICE H

## COTIZACIONES

### Torre de enfriamiento



MESAN USA - 3620 NW 115th Ave., Doral, FL 33178  
 Phone: 305-471-9050; Fax: 305-471-9001  
 sales@mesanusa.com; www.mesanusa.com

Version: 20170509

**Cooling Tower Data**

Series:	MCC-TRL Counter Flow Induced Draft, L Type		
Model:	MCC-LT-06-15-G	CTI Certification:	C26G-12R03
Cell(s) Per Set:	1	Fan Motor Pole No.:	6 p
Fan Type:	Axial	Fan Motor Power Per Cell:	20 hp
Fan Diameter:	116 "	Fan Motor Power Total:	20 hp
Fans Per Cell:	1	Air Flow Per Cell:	123017 cfm
Water Pressure Drop:	22.4 ft	Air Flow Total:	123017 cfm
Sound Pressure Level:			

**Performance Data**

Water Flow Rate Per set:	1133.1 gpm	Evaporation Loss:	0.926 %
Entering Water Temp.:	95°F	Drift Loss:	≤ 0.001 %
Leaving Water Temp.:	85°F	Make-up Water:	≤ 1.5 %
Ambient Wet Bulb Temp:	80°F	Heat Rejection Capacity:	5672 MBH
Range:	10°F	This selection satisfies your design conditions.	
Approach:	5°F		

**Physical Data**

	Per Set	Total Per Set
Length:	11'-10"	Dry Weight: 12238 lb
Width:	19'-12"	Operating Weight: 24784 lb
Height:	17'-11 3/4"	

Note: Weights and dimensions do not include options.

2	2	MCC-LT-06-15	<b>MESAN USA counterflow, Cooling Tower</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1200 gpm @ 95/85/80 °F WB</li> <li>• HDGS casing, structure and hardware</li> <li>• 20 HP TEAO 460/3/60 motor</li> <li>• HDGS equalizing connection</li> <li>• CTI CERTIFIED</li> <li>• HDGS casing, structure and hardware</li> <li>• Access ladder</li> </ul>	\$ 46,200.00	\$ 92,400.00
---	---	--------------	--	--------------	--------------

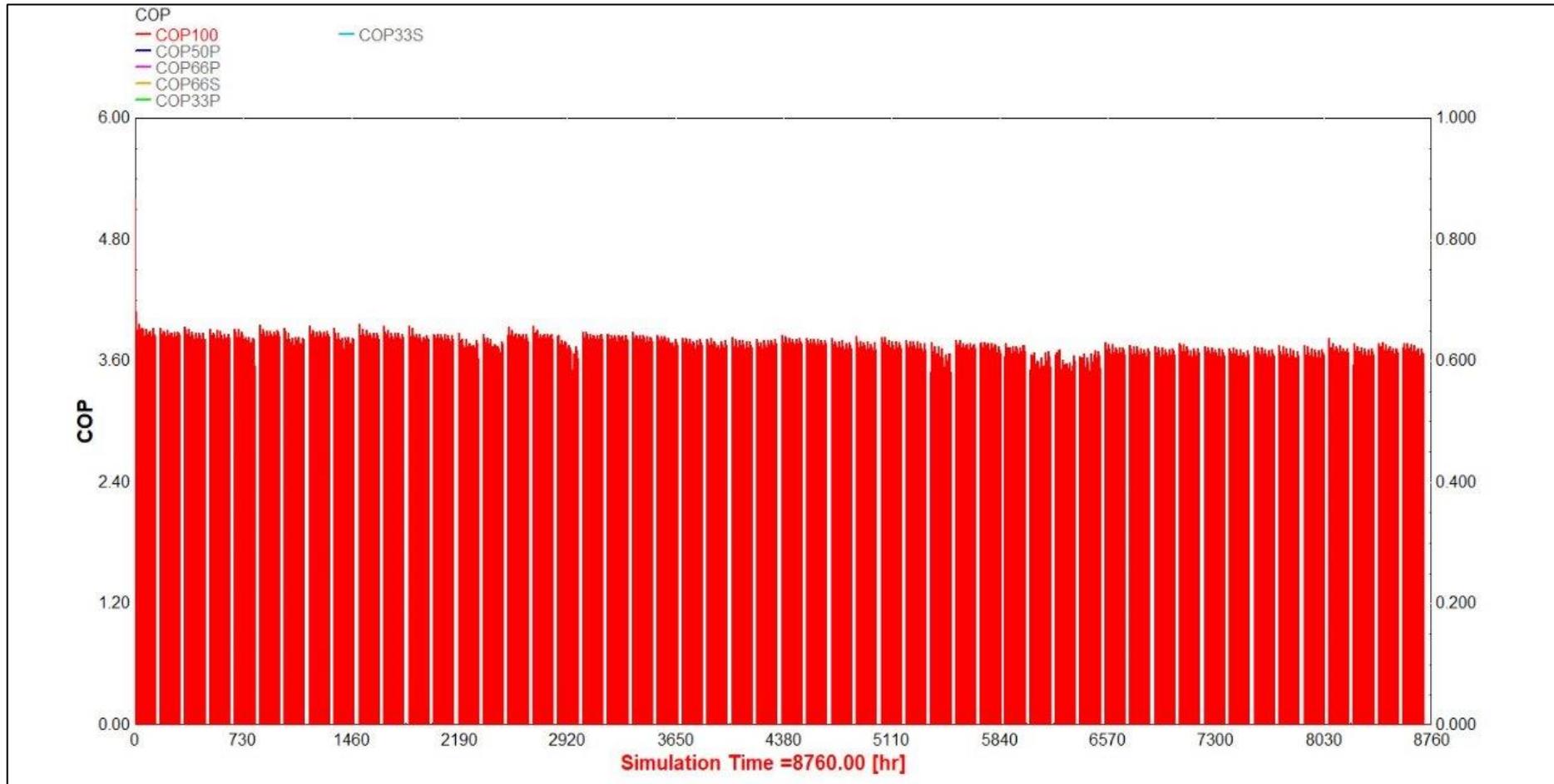
### Tuberías y accesorios

La cotización se la realizó vía telefónica con el Ing. Jorge Soria con número 0990707146, trabajador de la empresa "Termocruz".

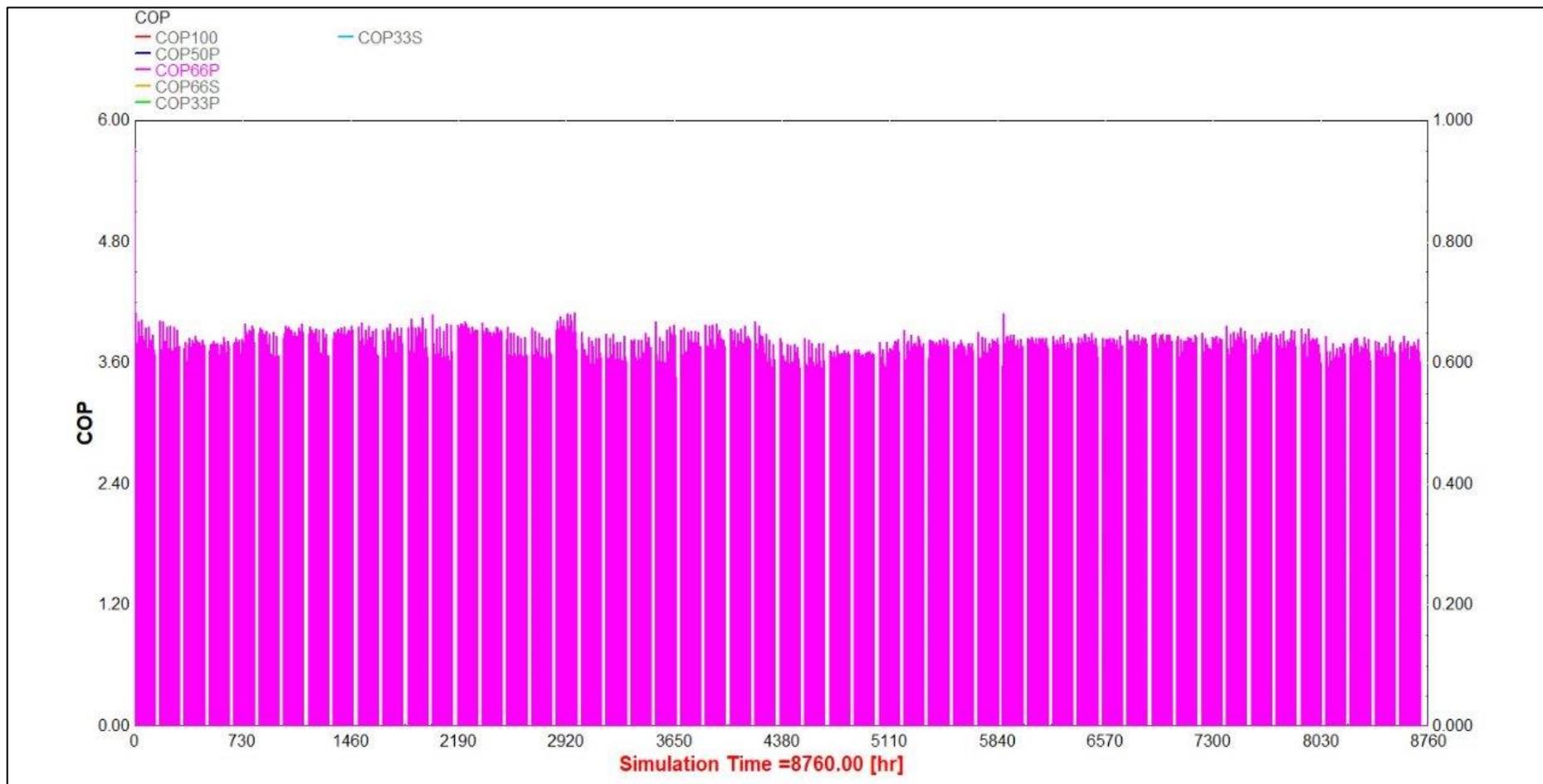
# **APÉNDICE I**

## **GRÁFICAS DE DESEMPEÑO TÉRMICO**

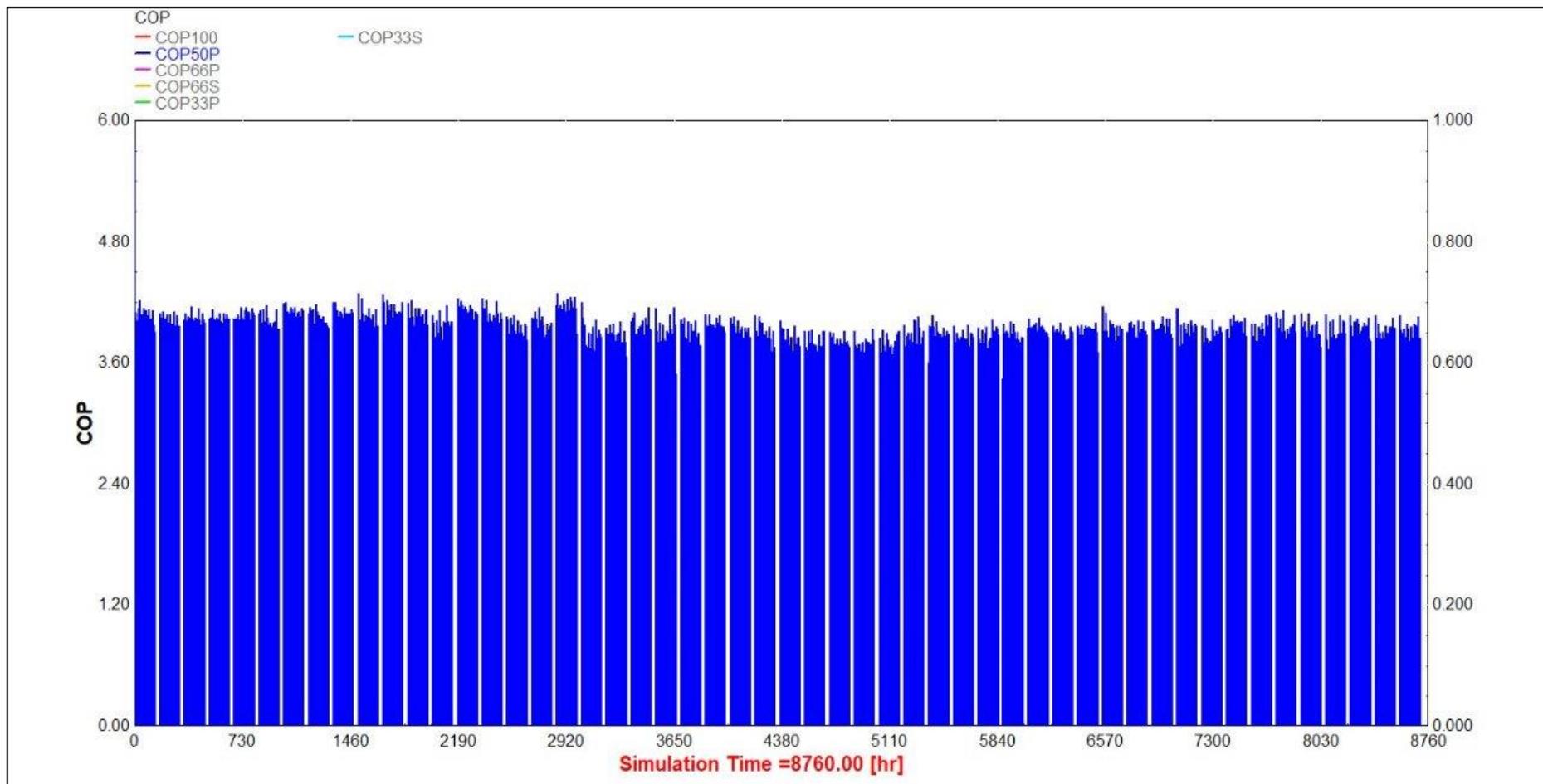
### Sistema Geotérmico al 100%



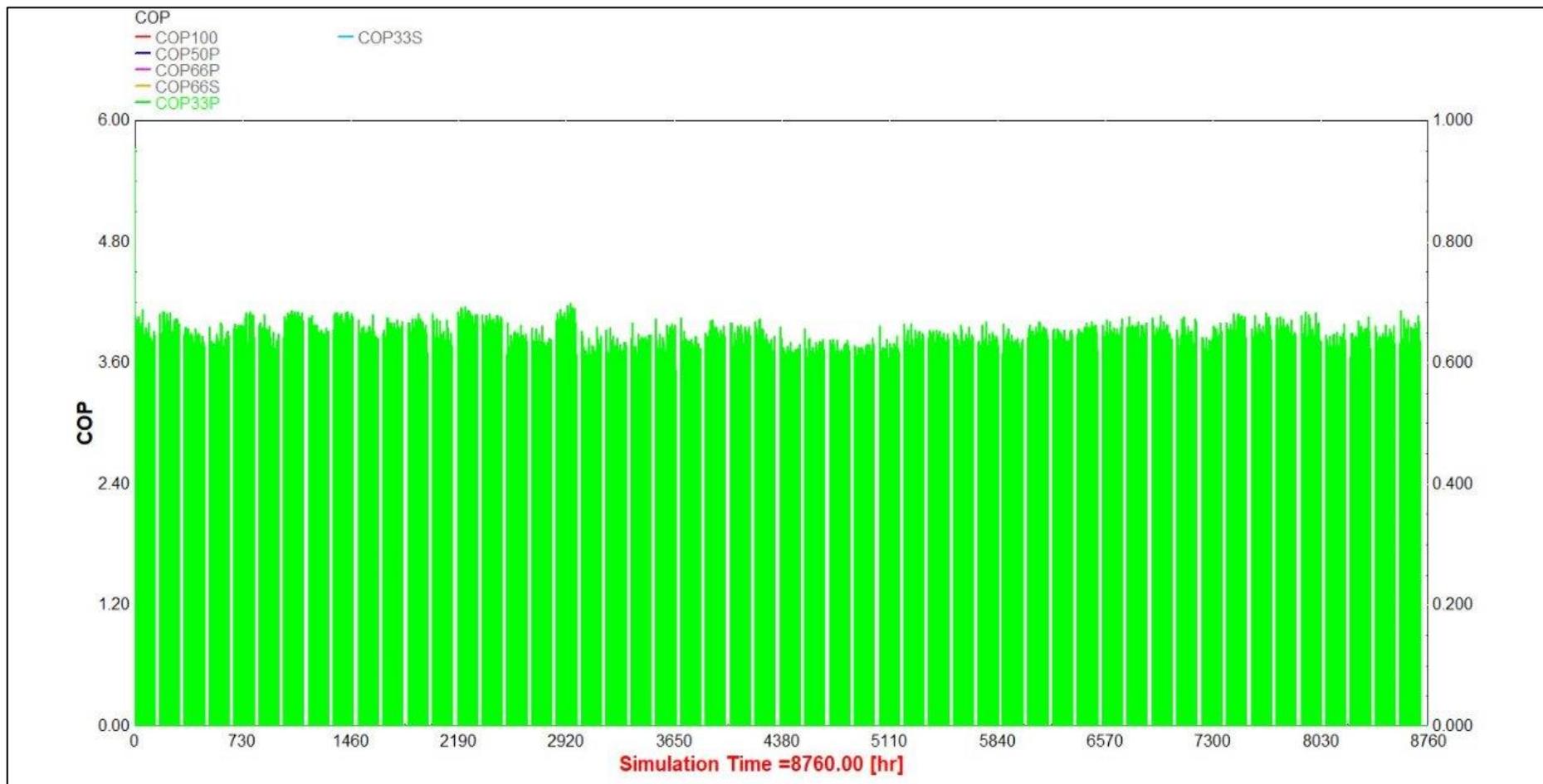
### Sistema híbrido (GSHP 67% - CT 33%)



**Sistema híbrido (GSHP 50% - CT 50%)**

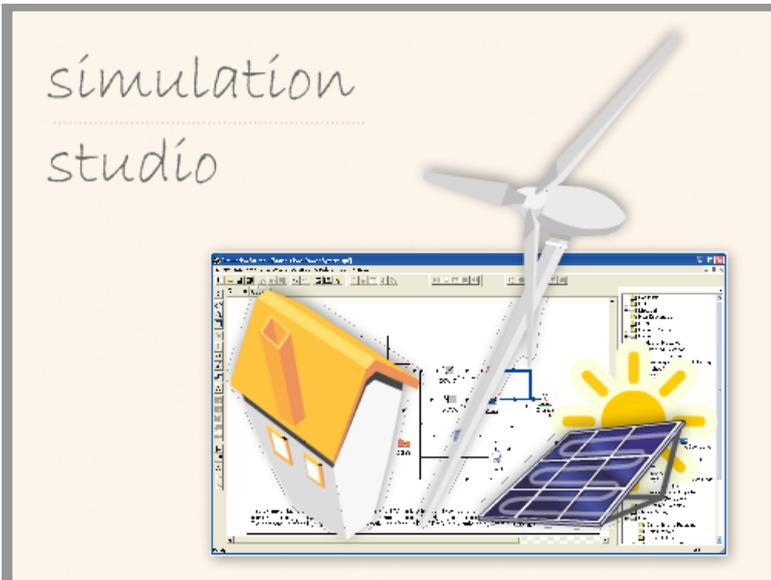


**Sistema híbrido (GSHP 33% - CT 67%)**



# APÉNDICE J

## LICENCIA TRNSYS



Licensed to

UserName = Students

Company = Escuela Superior Politecnica del Litoral

UserId = 17-T0047

LicenseKey = 00000010-99999999-55520001-17182682

Activation key: MRF

Return  
Licence

OK

Version: 5.4.0.0

Trnsys Version: 17.02.0005

Copyright (C) 2009-2012