



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

# PRE-ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE ENERGÍA SOLAR PARA PILAS DE BIOLIXIVIACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

JORGE FELIPE MONARDES PINTO

PROFESOR GUÍA:  
TOMAS VARGAS VALERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
LEANDRO HERRERA ZEPPELIN  
CRISTIAN SALGADO HERRERA

SANTIAGO – CHILE

ENERO 2010

## Resumen

La biolixiviación de minerales de cobre en pilas es un tecnología establecida en la industria minera del cobre. Sin embargo, la rentabilidad de estos procesos se puede aumentar considerablemente si se aumenta la temperatura de operación de lechos minerales lixiviados, ya que esto puede activar la acción de microorganismos termófilos con el consecuente aumento en la eficiencia y la rapidez con que se extrae el cobre desde el mineral.

El objetivo de este trabajo de título es evaluar preliminarmente la factibilidad técnica económica del calentamiento de pilas de biolixiviación mediante el uso de energía solar. Se analizó en particular un esquema tecnológico novedoso mediante el cual las pilas de biolixiviación se calientan mediante la incorporación de vapor de agua en el flujo de aire usado para la oxigenación del proceso. Para ello se desarrolló un modelo matemático que permitió evaluar el efecto del aumento de la temperatura, humedad y flujo del aire de alimentación sobre los perfiles de temperatura de la solución lixivante a lo alto del lecho mineral. Se modeló el caso de una pila de biolixiviación de 10 metros de altura, altura promedio a las usadas industrialmente.

En una primera etapa se modeló el caso en que el lecho es irrigado con un flujo de solución,  $L$ , de  $12,060 \text{ lt/m}^2 \text{ hr}$  y el flujo de aire,  $G$ , es  $10,188 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ hr}$ , y se estudió el efecto del aumento de la temperatura del aire entre  $20$  y  $315^\circ\text{C}$  y las variaciones de humedad entre  $0$  y  $0.1 \text{ Kg agua/Kg aire}$ . Los resultados de esta etapa indicaron que es posible obtener un aumento en la temperatura de la solución lixivante de  $18$  a  $60^\circ\text{C}$  cuando se aumenta la temperatura de entrada del aire a  $100$  y  $315^\circ\text{C}$ . Esto prueba que con este método sería posible activar los microorganismos termófilos, pero evitando la creación de zonas de calentamiento local que puedan dañar a los microorganismos lixiviantes.

En una segunda etapa se modeló el sistema para  $L = 10 \text{ lt/m}^2 \text{ hr}$  y  $G = 0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ hr}$ , valores más cercanos a los usados industrialmente. Los resultados de esta etapa indicaron que para mejorar la eficiencia del calentamiento hacia el interior del lecho es necesario subir 10 veces el flujo de aire y además aumentar la humedad del aire a valores sobre  $0.05 \text{ Kg agua/Kg aire}$ .

Se efectuó un evaluación económica preliminar del uso de la energía solar para calentamiento de pilas de biolixiviación considerando un costo de inversión de  $10^6 \text{ €/MW}$ , un precio del cobre de  $\text{US\$ } 3/\text{lb}$ , una pila de 2 hectáreas de superficie y 10 metros de alto, y un aumento de la recuperación de cobre del 29.29%. La que entregó un VAN =  $\text{USD\$ } 9,695,251$  una TIR = 34%, un IVAN = 58%, una potencia de planta termosolar necesaria del 11.13 MW y 1.85 hectáreas de superficie para estos equipos solares. Estos resultados demostraron un potencial económico existente en este proyecto, el cual debe ser objeto de mayores estudios a futuro.

## Agradecimientos

WOOOW... hay mucha gente a la que agradecer, considero que gran parte de la vida de cada ser humano depende y se desarrolla, gracias a la influencia y acción de otros seres humanos a lo largo de nuestra existencia, pero a continuación vendrán los más relevantes para esta memoria de título.

Primero que todo a mi abuelita Elsa, quien desde pequeño me educó y enseñó la importancia de ser un individuo completo y correcto en todo lo que hiciese. Ella fue la fuerza motriz que desde mi niñez me formó para ser alguien exitoso, gracias a ella nada ha significado un esfuerzo sobre natural en mi vida, muy por el contrario, todo fluye a través de un curso armonioso ☺.

A mi familia: mi madre, quien siempre me ha amado racional, como irracionalmente y que gracias a su sacrificio a podido mantener totalmente sola, la estabilidad financiera de una familia durante más de 24 años; mi hermana, quien durante 17 años ha tenido que cuestionarse que es este “hermano loco” que tiene y que sin cuestionamientos, me ha amado y respetado durante estos 17 años; mi tío Arturo, a quien le debo haber estudiado ingeniería química, ya que al ver mis puntajes obtenidos en la PSU no me dejó elegir la carrera de Licenciatura en Química, lo cual, por lo cierto hubiese sido un grave error... También me siento en la obligación de agradecer a él su apoyo durante este último tiempo; mi primo Tuti, mi prima Mandy y mi tía Rosi, quienes son la familia más cercana que tengo y junto a ellos siento un amor de familia que no logro sentir en otro lugar.

A mis amigos: Andrés Stevenson, Cristian Stevenson y Raúl Rodas, por haberse criado conmigo y haber vivido como hermanos durante más de 14 años en la comuna de La Reina; A Javier Farías, por haber sido mi hermano toda mi estadía por la educación básica y media; A José Luis Caroca, Rodrigo Lewit, Javier Ayala, Germán Ibarra, Ricardo Díaz, Lautaro Cuadra, Tomás Niklitschek, Priscila Valencia y Miguel Concha, por haber sido mis compañeros de viaje en lo que significa ser un beachefiano. En especial a Caroca, del cual aprendí todo lo que sé sobre simulación computacional y del cual espero poder seguir aprendiendo. También a Andrés Soto-Bubert, Gonzalo Rund y Claudio Escobar por sus invaluable enseñanzas y consejos en el área profesional. To Rusty Simpkins, Aaron Lutz, Chris Thacker, Greta Kaempf, Laura Palimeno and Calie Berry for taught me the reason and the kindness of the American logic, which I use in everything I do.

Y finalmente a mis profesores: A Tomás por haberme dado este interesante tema, el cual espero que podamos seguir estudiando, gracias a su continuo apoyo esta tesis fue posible de elaborar y finalizar; Leandro por ser el mejor docente que he tenido durante los 6 años de mi carrera, su apoyo tanto técnico como humano es extremadamente necesario en nuestra educación, para mí fue un verdadero honor haberlo conocido; Cristian por su preocupación en la acuosidad de mi tesis, estoy seguro que gracias a él, esta tesis logró una calidad técnica sumamente alta, muchas gracias por la insistencia en que mejorara mi trabajo. Podría continuar escribiendo, pero no tiene sentido... si se me olvidó alguien, mis más sinceras disculpas, y que no caiga duda que humildemente le digo: muchas gracias !!

Sinceramente, Jorge Monardes – Enero 2010.

# Índice de Contenidos

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes Generales.....	1
1.1.1	La minería del cobre en Chile .....	1
1.1.2	La Hidrometalurgia del Cobre .....	1
1.1.3	Lixiviación y Biolixiviación del cobre .....	4
1.1.4	Pilas de Biolixiviación .....	5
1.2	Motivación .....	7
1.2.1	Cinética de microorganismos .....	7
1.3	Descripción del Proyecto .....	9
1.3.1	Calentamiento interno de una pila de biolixiviación.....	10
1.3.2	Tecnología Solar .....	11
1.4	Tecnología cilindro parabólica .....	13
1.5	Mecanismos de la biolixiviación.....	15
1.6	Modelamiento para pilas de biolixiviación .....	16
1.6.1	Proceso de Deshumidificación .....	17
2	Objetivos.....	26
2.1	Objetivos generales .....	26
2.2	Objetivos específicos .....	26
3	Metodología .....	27
4	Resultados .....	30
4.1	Evaluación Técnica .....	30
4.1.1	Temperatura de entrada aire-vapor de 20 °C .....	31
4.1.2	Temperatura de entrada aire-vapor de 100 °C .....	34
4.1.3	Temperatura de entrada aire-vapor de 315 °C .....	38
4.2	Evaluación Técnica, utilizando tasas de aireación y de irrigación de la minera Escondida .....	41
4.2.1	Temperatura de entrada aire-vapor de 20 °C .....	42
4.2.2	Temperatura de entrada aire-vapor de 100 °C .....	44
4.3	Evaluación Técnica, escenarios con mejoras .....	48
4.3.1	[Escenario 1].....	48
4.3.2	[Escenario 2].....	53
4.4	Evaluaciones económicas .....	55
5	Discusiones .....	58
5.1	Evaluación Técnica .....	59
5.2	Evaluación Técnica, utilizando tasas de aireación y de irrigación de la minera Escondida .....	60
5.3	Evaluación Técnica, escenarios con mejoras .....	60
5.4	Evaluaciones económicas .....	61
5.5	General.....	61
6	Conclusiones .....	63
7	Referencias .....	65
	Anexo A – Datos de entrada utilizados para la simulación en el programa de MATLAB .....	67
	Anexo B – Algoritmo.....	79
	Anexo C – Resultados del Modelo.....	83
	Anexo D – Sensibilidad del Modelo .....	88
	Anexo E – Flujos de Caja .....	90

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Funcionamiento básico en una pila de biolixiviación [6].	2
Figura 1.2: Etapas de una operación de biolixiviación convencional [7].	4
Figura 1.3: Esquema de la ingeniería de una pila de biolixiviación [18].	9
Figura 1.4: Infraestructura de aireación en una pila de biolixiviación [18,19].	11
Figura 1.5: Montaje completo de idea para la aplicación industrial [18].	12
Figura 1.6: Red de aireación en la aplicación industrial [18].	12
Figura 1.7: Tecnología termosolar, cilindro parabólica [20].	13
Figura 1.8: Diagrama de sistema solar cilindro parabólico [22].	14
Figura 1.9: Esquema del mecanismo en un <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> .	15
Figura 1.10: Modelo básico de un material poroso [28].	16
Figura 1.11: Esquema de los fenómenos de transferencia presentes las 3 fases presentes en el volumen de control (dz) de una pila de biolixiviación.	17
Figura 1.12: Fenómenos de Transferencia de Masa y Energía, presentes en un proceso de Deshumidificación de un gas [30].	18
Figura 1.13: Estructuras de cartas psicrométricas.	21
Figura 1.14: Carta psicrométrica para aire-vapor, 1 atm estándar. En unidades SI.	22
Figura 1.15: Sección diferencial de la transferencia entre una fase gaseosa y una líquida.	23
Figura 3.1: Carta de Flujo a seguir en el trabajo de título.	27
Figura 3.2: Ilustración del análisis diferencial finito, a lo largo de una pila de biolixiviación.	28
Figura 4.1: Diagrama conceptual de Evaluación económica.	55

## Índice de Gráficos

Gráfico 1.1: Actividad de microorganismos mesófilos, termófilos moderados y termófilos extremos [15].	8
Gráfico 1.2: Recuperación anual de cobre en un botadero [3].	9
Gráfico 4.1: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 1.	32
Gráfico 4.2: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 2.	33
Gráfico 4.3: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 3.	34
Gráfico 4.4: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 4.	35
Gráfico 4.5: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 5.	36
Gráfico 4.6: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 6.	37
Gráfico 4.7: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 7.	38
Gráfico 4.8: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 8.	39
Gráfico 4.9: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 9.	40
Gráfico 4.10: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 10.	41
Gráfico 4.11: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 1 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.	42
Gráfico 4.12: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 2 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.	43
Gráfico 4.13: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 3 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.	44
Gráfico 4.14: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 4 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.	45
Gráfico 4.15: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 5 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.	46
Gráfico 4.16: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 6 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.	47
Gráfico 4.17: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 1 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.	48

Gráfico 4.18: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 2 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.....	49
Gráfico 4.19: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 3 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.....	50
Gráfico 4.20: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 4 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.....	51
Gráfico 4.21: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 5 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.....	52
Gráfico 4.22: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 2 / Etapa 1 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.....	53
Gráfico 4.23: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 2 / Etapa 2 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.....	54
Gráfico 4.24: Calentamiento del perfil de temperatura de la fase líquida a, representado en 2 etapas de tiempo; Escenario 2 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.....	54

## Índice de Imágenes

Imagen 1.1: Pila de Biolixiviación. ....	3
Imagen 1.2: Pilas de Biolixiviación [6]. ....	6
Imagen 1.3: Línea de aireación en una pila de biolixiviación [6]. ....	10
Imagen 1.4: Paneles cilindro parabólicos en el desierto de Negev, Israel [24]. ....	14



## Índice de Tablas

Tabla 4.1: Parámetros utilizados en todos los resultados. ....	31
Tabla 4.2: Tasas de aireación e irrigación de pila de biolixiviación operando en la minera escondida. ....	42
Tabla 4.3: Parámetros utilizados en la evaluación económica. ....	56
Tabla 4.4: Principales resultados económicos para implementación del escenario 2 – 2 hectáreas de pila. ....	57

## Nomenclatura

$a$	: Superficie interfacial específica, también conocida como coeficiente de empaque; $L^2 L^{-3}$
$C_{PA}$	: Capacidad calorífica del vapor de agua a presión constante; $E M^{-1} T^{-1}$
$C_{PB}$	: Capacidad calorífica del aire a presión constante; $E M^{-1} T^{-1}$
$C_{PA,L}$	: Capacidad calorífica del agua líquida a presión constante; $E M^{-1} T^{-1}$
$C_{PS}$	: Capacidad calorífica de una mezcla gas-vapor, también conocida como calor húmedo; $E M^{-1} T^{-1}$
$d_p$	: Diámetro específico de partícula en material mineral seleccionado; $L$
$F_G$	: Coeficiente de transferencia de masa; $mol L^{-2} \theta^{-1}$
$G_S$	: Masa velocidad molar; $mol L^{-2} \theta^{-1}$
$G'_S$	: Masa velocidad superficial del gas seco; $M L^{-2} \theta^{-1}$
$h$	: Altura total de lecho relleno simulado; $L$
$h_G$	: Coeficiente de transferencia de calor por convección en la fase gaseosa; $E L^{-2} T^{-1} \theta^{-1}$
$h_L$	: Coeficiente de transferencia de calor por convección en la fase líquida; $E L^{-2} T^{-1} \theta^{-1}$
$h'_G$	: Coeficiente de transferencia de calor por convección en la fase gaseosa, corregido por la transferencia de masa; $E L^{-2} T^{-1} \theta^{-1}$
$H$	: Entalpía; $E \theta^{-1}$
$\Delta H$	: Diferencia de entalpía entre los puntos "1" y "2"; $E \theta^{-1}$
$k_{th}$	: Conductividad térmica en la fase líquida; $E L^{-1} T^{-1} \theta^{-1}$
$k_Y$	: Coeficiente de transferencia de masa para la fase gaseosa; $M L^{-2} \theta^{-1} (M/M)$
$L'$	: Masa velocidad superficial del líquido; $M L^{-2} \theta^{-1}$
$Le$	: Número de Lewis, $Sc/Pr$ ; <b>adimensional</b>
$M$	: Peso molecular; $M mol^{-1}$
$M.O.$	: Microorganismos; <b>adimensional</b>
$n$	: Número total de discretizaciones realizadas por el modelo, regularmente 10000; <b>adimensional</b>
$N$	: Flux de transferencia de masa; $mol L^{-2} \theta^{-1}$
$p$	: Presión de vapor; $F L^{-2}$
$\bar{p}$	: Presión de parcial; $F L^{-2}$
$Pr$	: Número de Prandtl, $C_p/\mu/k$ ; <b>adimensional</b>
$q$	: Flux de transferencia de calor; $E L^{-2} \theta^{-1}$
$\dot{Q}_1$	: Flux de transferencia de calor, asociado al calor sensible de la mezcla aire-vapor; $E L^{-2} \theta^{-1}$
$\dot{Q}_2$	: Flux de transferencia de calor, asociado al calor latente del vapor; $E L^{-2} \theta^{-1}$
$Sc$	: Número de Schmidt, $\mu/\rho D_{AB}$ ; <b>adimensional</b>
$T$	: Temperatura; $T$
$TIR$	: Tasa de Rentabilidad Interna; %
$VAN$	: Valor Actual Neto; <b>USD</b>
$v_H$	: Volumen húmedo, volumen de mezcla gas-vapor/masa de gas seco; $L^3 M^{-1}$
$Y'$	: Humedad absoluta; $M M^{-1}$
$\lambda$	: Calor latente de evaporación; $E M^{-1}$
$\mu$	: Viscosidad dinámica; $M L^{-1} \theta^{-1}$
$\rho$	: Densidad; $M L^{-3}$
$z$	: Longitud o altura de la parte activa de una sección de la pila de biolixiviación; $L$

$\varphi$  : Coeficiente de porosidad del material, volumen poroso/volumen total; **adimensional**

### **Subíndices**

0 : Condición de referencia

1 : Posición de la zona inferior de la pila de biolixiviación

2 : Posición de la zona superior de la pila de biolixiviación

*as* : Saturación adiabática

*av* : Promedio ponderado

*A* : Sustancia A, el agua

*B* : Sustancia B, el aire

*PR* : Punto de rocío

*PE* : Punto de ebullición

*G* : Pertenciente al gas

*i* : Interfase

*k* : Posición de la zona k-ésima de la pila de biolixiviación

*L* : Pertenciente al líquido

*r* : roca, fase sólida

*s* : Saturación

*t* : Total

### **Unidades<sup>1</sup>**

*E* : Energía

**Euro** : Moneda del Euro Europeo

*F* : Fuerza

**ha** : Hectárea de superficie

*L* : Longitud

**mol** : Mol

*M* : Masa

*T* : Temperatura

**USD** : Moneda del Dólar Estado Unidense

$\theta$  : Tiempo

% : Porcentaje

---

<sup>1</sup> Todo el resto de las unidades se encuentran expresadas con respecto al sistema internacional, S.I.

*En memoria a la mujer que me enseñó a razonar como ingeniero  
desde que he tenido 6 años de edad.  
Todos mis logros obtenidos y ha por obtener, han sido  
gracias a sus enseñanzas y a su amor incondicional.  
Desde que dejó este mundo la he extrañado todos los días de mi vida  
Gracias abuelita Elsa.*

# 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes Generales

### 1.1.1 La minería del cobre en Chile

La participación de Chile en la minería del cobre los últimos 30 años ha aumentado fuertemente al punto de desplazar a los Estados Unidos como el primer productor mundial de este metal. Actualmente Chile cuenta con una producción anual del orden de 5,557,000 toneladas por año (35.8% de la producción mundial) [1]. Este avance del país para llegar a ser el principal productor mundial del metal rojo estuvo acompañado de una profunda transformación en la minería. Una de las más importantes manifestaciones, fue el cambio estructural que dio paso al masivo ingreso de capitales privados a esta industria, tanto de índole nacional como internacional. Otro aspecto relevante, corresponde a las innovaciones tecnológicas que esta industria ha adaptado en los últimos años, particularmente los del campo de la hidrometalurgia extractiva del cobre.

El tratamiento hidrometalúrgico de un mineral incluye 3 principales etapas, la lixiviación (LX), la extracción por solventes (SX) y la electro-obtención (EO). El uso de este proceso a nivel mundial, se encuentra en un crecimiento considerable, teniendo en cuenta que en el periodo 1990-1998 la producción mundial de cátodos que origina este proceso aumentó de 708,000 toneladas por año, a 2,013,000 toneladas por año. Más aún, la participación que tuvo el proceso de la hidrometalurgia, en este periodo a nivel mundial, paso de ser un 9.6% a un 19.8% [2].

Principalmente por las razones mencionadas anteriormente, se aprecia estadísticamente una tendencia creciente al proceso de la hidrometalurgia en la industria del cobre. Lo que hace urgente en Chile un mayor estudio de los 3 subprocesos que componen a la hidrometalurgia (LX-SX-EO). Este trabajo de título, se encuentra enfocado a la etapa LX, correspondiente a la lixiviación del mineral cuprífero.

### 1.1.2 La Hidrometalurgia del Cobre

La vía hidrometalúrgica es posible de separar en 2 principales ramas, correspondientes a la de minerales oxidados y a la de minerales sulfurados. El área de interés del trabajo realizado en esta memoria corresponde a la biolixiviación, la cual principalmente corresponde a la rama de minerales sulfurados. En el proceso de la biolixiviación es posible de procesar minerales tanto de alta como de baja ley, generalmente los minerales de alta ley, corresponden a sulfuros secundarios tales como:  $\text{CuS}$  (Covelina),  $\text{Cu}_2\text{S}$  (Calcosina) y  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  (Bornita), los cuales son lixiviados por medio de pilas. Los minerales de baja ley corresponden a minerales calificados como ROM (run of mine, correspondiente a un mineral de desecho sin chancar ni aglomerar, compuestos mineralógicamente por  $\text{CuFeS}_2$  (Calcopirita) y  $\text{FeS}_2$ (pirita)), en los últimos años estos minerales han ganado importancia en la industria minera, estos son posibles de lixiviar por medio de botaderos y pilas [3]. Grandes volúmenes de desechos mineros de minerales con baja ley de

cobre han sido generados año tras año, lo que hace de este, un recurso bastante significativo. La ley del mineral comúnmente es muy baja, como para justificar económicamente el costo de molienda y flotación [4].

La lixiviación del cobre puede llevarse a cabo en distintas modalidades: lixiviación en pilas y botaderos, lixiviación in situ [3]. Sin embargo, la lixiviación en pilas y botaderos son las más populares, debido a los grandes volúmenes de producción que en éstas se pueden trabajar, entre otras razones.

La lixiviación en pilas puede desarrollarse en un periodo de meses y a veces durar un par de años (se sabe que en botaderos estos periodos pueden durar entre 2 a 25 años) [5]. Principalmente esto último depende de la cantidad de mineral y la ley que este posea.

El proceso más significativo que ocurre en una pila de biolixiviación es el enriquecimiento de una solución ácida irrigada por la parte superior de la pila. Esta solución ácida inicialmente es pobre en mineral cobre, pero luego de traspasar todo el material poroso que conforma la pila sale por la parte inferior de ésta como un efluente cargado y rico en cobre comúnmente llamado PLS<sup>1</sup> [6]. Un esquema muy simplificado se encuentra en la figura 1.1, el cual resume el proceso llevado a cabo en una pila. Además en la imagen 1.1, se muestra una pila de biolixiviación.

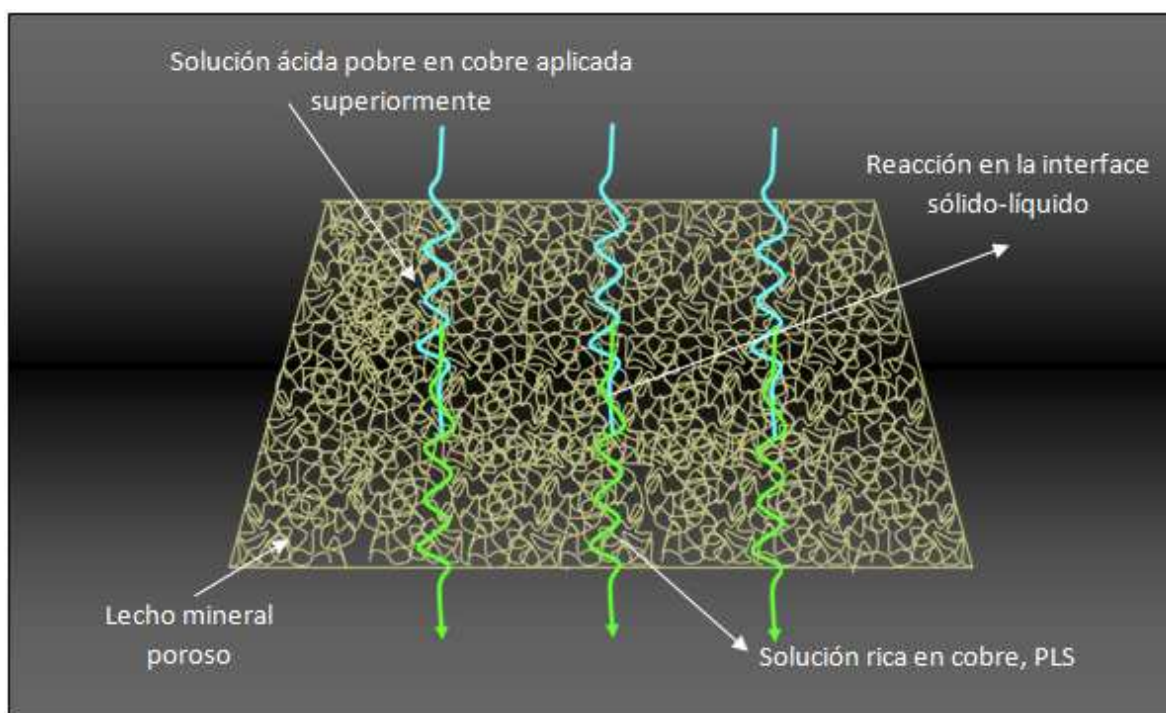


Figura 1.1: Funcionamiento básico en una pila de biolixiviación [6].

La hidrometalurgia ha comenzado a ser de gran atracción para la industria minera, por las siguientes razones [6].

<sup>1</sup> (Copper) Pregnant Leach Solution

- Utilización productiva del mineral de baja ley, que históricamente ha sido acumulado.
- Localización del material “on site”, es decir, en el mismo punto geográfico que la mina.
- Baja emisión de contaminantes durante el proceso, relativo a los demás procesos mineros.
- Baja tecnología necesaria para su aplicación industrial.
- Bajos costos.



**Imagen 1.1: Pila de Biolixiviación.**

El proceso de lixiviación cuenta con varias etapas, las cuales pueden ser divididas en 2 fases, una de construcción de la pila y la correspondiente operación y uso productivo de esta. La primera de estas fases corresponde al chancado y aglomeración del mineral, la segunda a la utilización productiva de la pila, la cual, como se mencionó anteriormente, puede durar periodos de 4 a 18 meses [7]. La figura 1.2 adjunta a continuación, ilustra estas etapas.

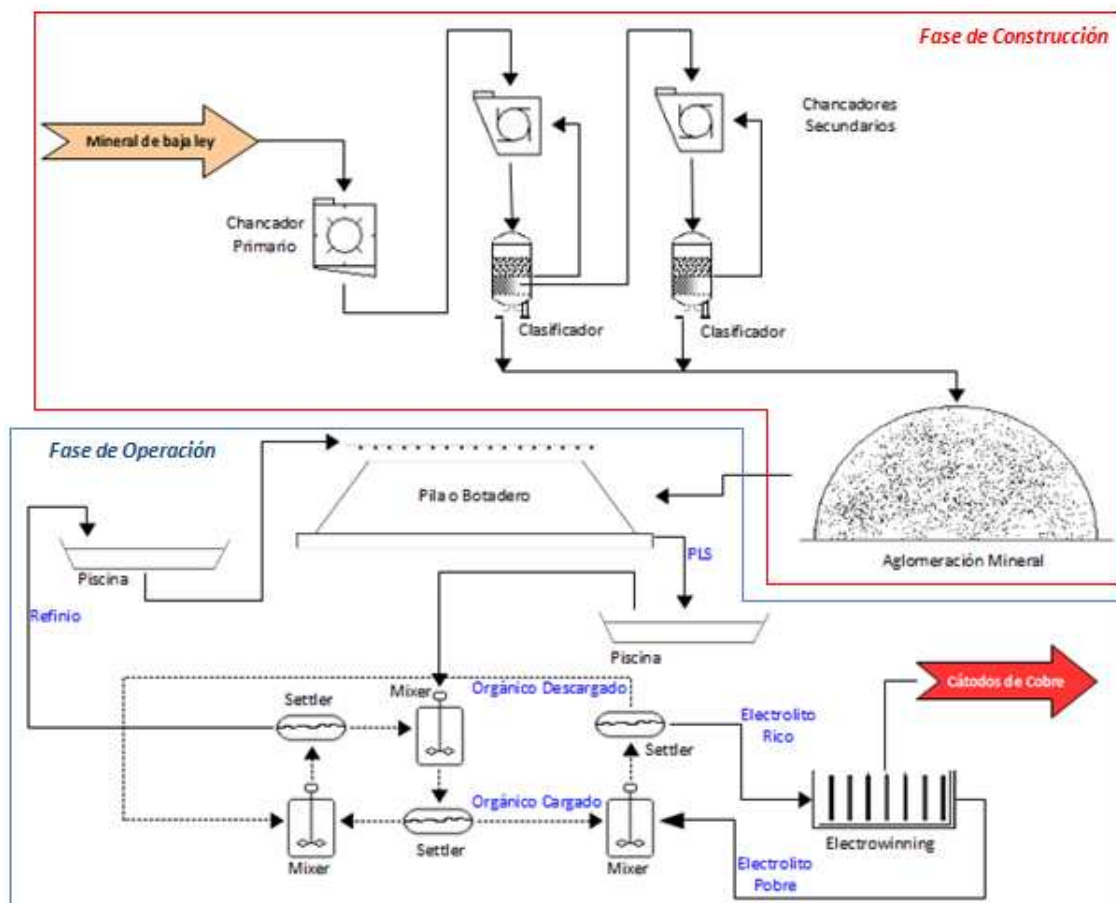
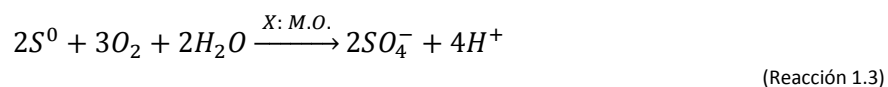
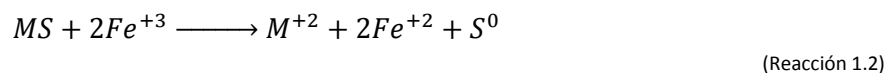
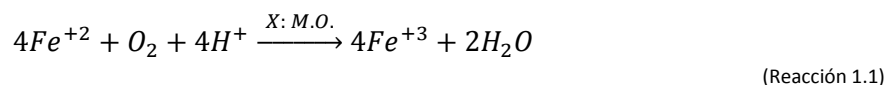


Figura 1.2: Etapas de una operación de biolixiviación convencional [7].

### 1.1.3 Lixiviación y Biolixiviación del cobre

La lixiviación se define como la disolución preferente de uno o más de los componentes contenidos en un mineral, por contacto con un reactivo contenido en una solución acuosa. En el caso de la lixiviación de minerales cupríferos se disuelve el cobre mediante lixiviación por contacto con soluciones ácidas [6,7,8].

La biolixiviación es un proceso que implica acción directa o indirecta de microorganismos presentes en minerales cupríferos [9]. Las reacciones biológicas – químicas involucradas en la biolixiviación, generalmente son resumidas en las tres siguientes:





La primera (Reacción 1.1), corresponde a la oxidación de iones ferroso a férrico y la importancia de esta reacción radica en que es catalizada por microorganismos, los cuales se encargan de aumentar las concentraciones de férrico en el medio. Esto mejora la cinética en la (Reacción 1.2), correspondiente a la oxidación de minerales sulfurados. En donde M representa el mineral de interés, en este caso el cobre ( $M=Cu$ ). Finalmente la (Reacción 1.3), representa la oxidación del azufre elemental, la cual también es asistida por microorganismos y además es conocida como formación de ácido [10]. Los fenómenos reales que ocurren dentro del mineral son bastante más complejos y en la actualidad, aún no son del todo conocidos. Pero a nivel de ingeniería, se sabe que la lixiviación y la biolixiviación son suficientes para explicar el transporte de masa (cobre) desde el mineral (fase sólida) hacia la solución rica en cobre, PLS (fase líquida).

En este trabajo de título, el estudio se centra en las pilas de biolixiviación.

#### **1.1.4 Pilas de Biolixiviación**

Una pila de biolixiviación corresponde a un apilamiento de mineral chancado y aglomerado, con el objetivo de extraer mineral en base al riego de soluciones ácidas con la ayuda de la acción catalítica de microorganismos lixiviantes [6]. Estas pilas poseen alturas de entre 2 a 20 metros, aunque existen casos excepcionales como en la minera Escondida, de pilas de hasta 30m de altura. La superficie por la que se extiende una pila, puede variar de 1 a 50 hectáreas y los ciclos de lixiviación son del orden de 4 a 18 meses para minerales sulfurados [7]. La composición mineral de una pila corresponde básicamente a sulfuros primarios (Pirita, Calcopirita y Enargita) y sulfuros secundarios (Calcosina, Covelina y Bornita) [2], la imagen 1.2 ilustra un conjunto de pilas de biolixiviación.



Imagen 1.2: Pilas de Biolixiviación [6].

Una variable importante a conocer en una pila de biolixiviación, corresponde el saber que microorganismos son los que se encuentran presentes en estos medios. Principalmente microorganismos mesófilos, son los que se encuentran en condiciones naturales en una pila:

- *Acidithiobacillus ferrooxidans*
- *Acidithiobacillus thiooxidans*
- *Leptospirillum ferrooxidans*

Pero se sabe que en condiciones de temperatura extrema, termófilos moderados serían capaces de desarrollarse en estas condiciones (específicamente el *Acidithiobacillus caldus*).

Estos microorganismos son los responsables de los fenómenos de lixiviación del mineral en una pila, y es por esto que la cinética bacteriana juega un rol fundamental en determinar las velocidades asociadas a las reacciones explicadas en la sección 1.1.3. Es por esta última razón el gran interés que existe a nivel industrial de mejorar esta cinética bacteriana, la cual será explicada en mayor detalle, en la sección 1.2.1 a continuación.

## 1.2 Motivación

### 1.2.1 Cinética de microorganismos

El proceso de biolixiviación en pilas tiene lugar en presencia de microorganismos, tanto de manera natural o inoculada en la solución de riego en las pilas [11]. En condiciones reales de operación en una pila de biolixiviación, se encuentran muchos tipos de microorganismos [12], algunos de ellos capaces de oxidar el ion ferroso y el azufre elemental. Los microorganismos lixiviantes operan a diferentes rangos de temperatura. Microorganismos mesófilos, termófilos moderados y termófilos extremos, operan en rangos de temperatura de 20-40 °C, 40-60 °C y 60-80 °C, respectivamente [11]. Los termófilos son capaces de sobrevivir y oxidar a altas temperaturas, pero se inactivan a bajas temperaturas. Actualmente ha existido un gran interés en el área de la biohidrometalurgia con respecto a estos microorganismos [13,14].

Muchos autores han realizado esfuerzos para representar el crecimiento de estos microorganismos con respecto a la temperatura del medio en el que estos se encuentran. Es así como en la literatura se ha definido una función llamada “dependencia de la tasa de crecimiento”,  $f(T)$ . La cual para organismos mesófilos tiene la forma de la ecuación 1.1 [15]. La dependencia de la tasa de crecimiento corresponde a una función adimensional que oscila entre los valores 0 y 1, en donde 0 corresponde a inactividad en la cinética y 1 al 100% de actividad de la cinética de la familia de microorganismos correspondientes.

$$f_1(T) = (21830090)T \frac{\exp(-7000/T)}{1 + \exp(236 - 74000/T)}$$

(Ec. 1.1)

De esta (Ec. 1.1) también es posible obtener la función de dependencia para los microorganismos termófilos moderados ( $f_2(T)$ ) y termófilos extremos ( $f_3(T)$ ). En el gráfico 1.1 se muestra las 3 curvas de dependencia en el crecimiento para los 3 tipos de microorganismos, en donde se puede notar que el valor máximo de la función de dependencia es 1. Este valor representa la máxima actividad de reproducción para cada uno de los tipos de microorganismos comentados anteriormente. Además se puede apreciar las temperaturas óptimas para las cuales se logra esta máxima actividad, como lo es para los mesófilos a 37.65°C [11], termófilos moderados a 44.5°C [16] y termófilos extremos a 70°C [17].

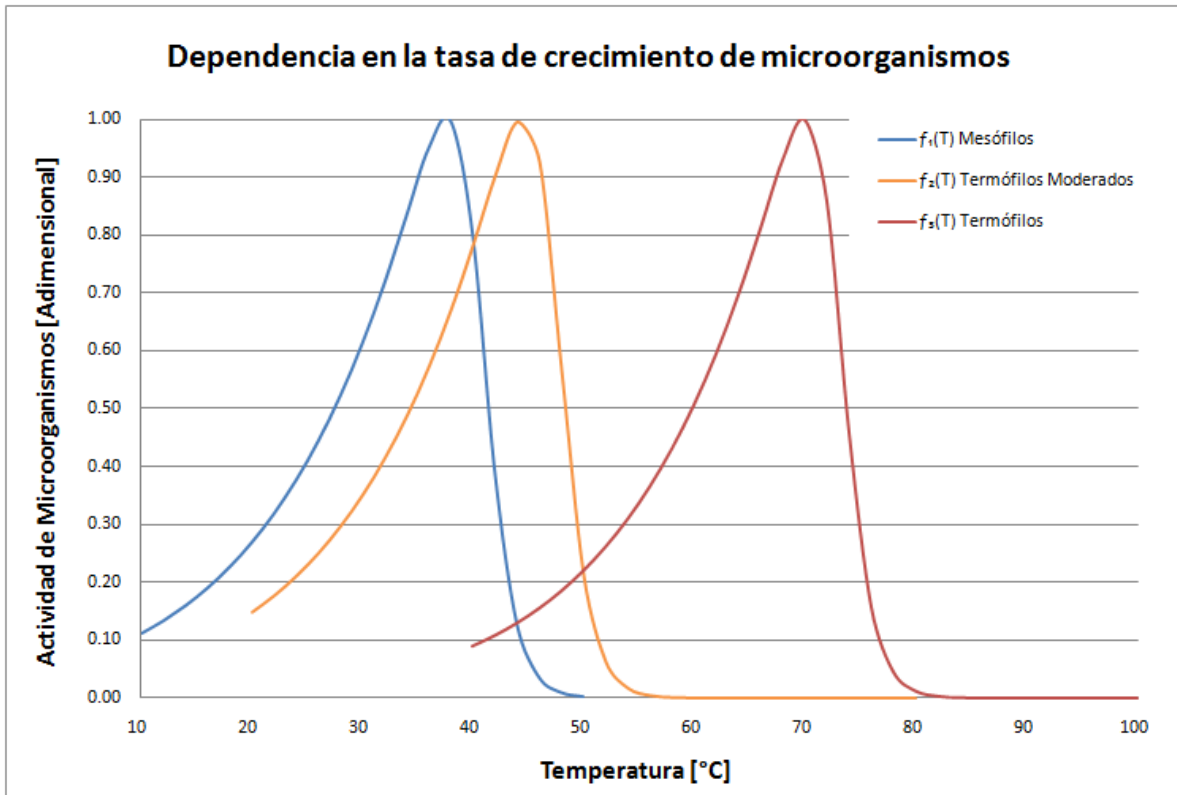


Gráfico 1.1: Actividad de microorganismos mesófilos, termófilos moderados y termófilos extremos [15].

Ante estas condiciones de altas temperaturas de operación, la biolixiviación ocurre a tasas de reacción más rápidas, que en condiciones normales de temperatura [11].

La presencia de microorganismos termófilos en una pila de biolixiviación, puede ocurrir de 2 maneras [11]:

- De manera natural, en la cual deben generarse las condiciones térmicas en la pila, para que estos microorganismos salgan de su estado de inactividad.
- De manera artificial, en la cual se cultivan estos microorganismos en un laboratorio y luego se inoculan dentro de la pila por medio de la solución de riego en estas.

Para procesos industriales la primera alternativa es la más atractiva, debido a la facilidad de poner en práctica a nivel industrial que esta posee y es esta alternativa, una de las metas del proyecto expuesto en esta memoria de título.

Como se ha explicado anteriormente en esta sección, es teórica y experimentalmente conocido, que la cinética química se incrementa con mayores temperaturas de operación en una pila de biolixiviación [11]. El aumento de la cinética química (sencilla de apreciar en la ecuación de Arrhenius), implica un aumento inmediato en las tasas de recuperación de cobre en una pila, en otras palabras, un aumento en la cinética química equivale a un aumento en la lixiviación mineral (cobre). Se debe tener especial cuidado al aumentar la temperatura de operación en la biolixiviación, ya que como muestra el gráfico 1.1 es posible llegar a temperaturas en donde la

actividad bacteriana comienza a decrecer, esto significa que por mucho que se aumente la cinética química con los aumentos de temperatura, la cinética bacteriana comenzaría a disminuir por este decrecimiento de la actividad bacteriana. El gráfico 1.2 en el cual se muestra como las tasas de recuperación anual de cobre, aumentan a medida que se aumenta la temperatura de solución de riego en un botadero ilustra una tendencia de un aumento de la cinética química a lo largo del intervalo de temperatura de 13 y 25 °C, pero se debe tener presente que es posible llegar a temperaturas mayores en donde estas altas temperaturas afecten la actividad bacteriana y por ende disminuyan las tasas de recuperación del cobre.

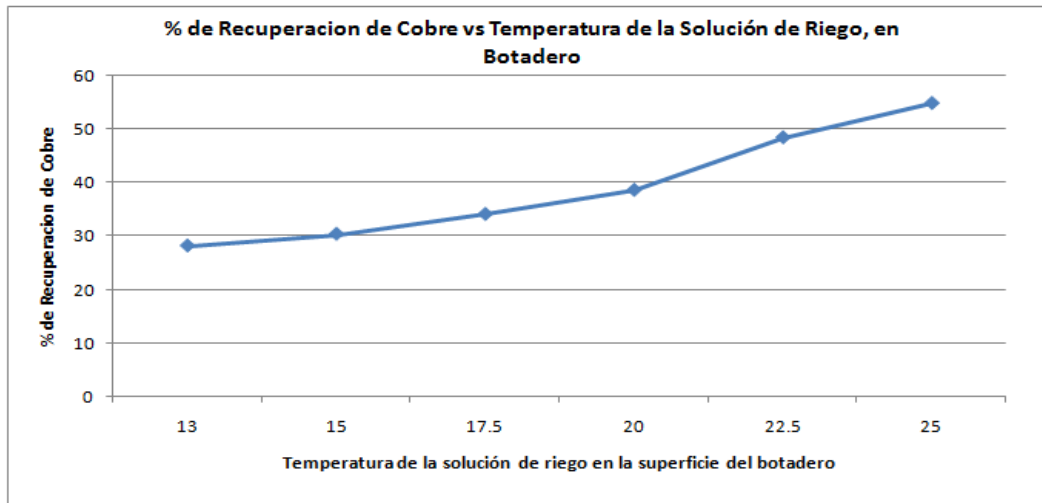


Gráfico 1.2: Recuperación anual de cobre en un botadero [3].

### 1.3 Descripción del Proyecto

Por los fundamentos explicados en el subcapítulo 1.2, es como se llega a la interrogante, de ¿cómo introducir calor en una pila, para aumentar las temperaturas al interior de esta y así obtener mayores tasas de recuperación del cobre? Las respuestas a esta pregunta pueden ser variadas. La alternativa que se eligió estudiar en este trabajo de título, posee variables favorables desde el ámbito técnico de la ingeniería en una pila, ver figura 1.3, además de razones positivas en el área económica y medio ambiental.

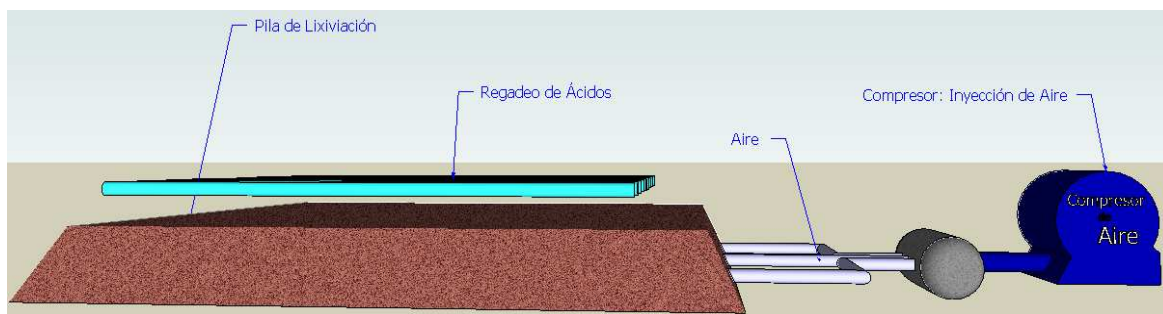


Figura 1.3: Esquema de la ingeniería de una pila de biolixiviación [18].

### 1.3.1 Calentamiento interno de una pila de biolixiviación

La idea consiste en calentar internamente estas pilas utilizando vapor, el cual debiese ser introducido por la parte inferior de ésta. Otra pregunta que nace automáticamente de esto, es ¿cómo introducir este vapor? La respuesta responde a razones favorables, desde el punto de vista de la ingeniería en las pilas de biolixiviación, la cual consiste en utilizar la infraestructura ya existente, correspondiente al sistema de aireación de éstas (una de las limitantes en las reacciones químicas dentro de una pila es el oxígeno presente en el medio, debido a que estos microorganismos, logran una mejor cinética de manera aeróbica. Para evitar esto, es que se realiza una inyección de aire, desde la parte inferior de esta por medio de un sistema de aireación). Se sabe que las pilas de biolixiviación en su base poseen un sistema de cañerías destinado a la inyección de aire, como se puede observar en la imagen 1.3. Además en la figura 1.4, se ilustra un esquema de este sistema de aireación.



Imagen 1.3: Línea de aireación en una pila de biolixiviación [6].

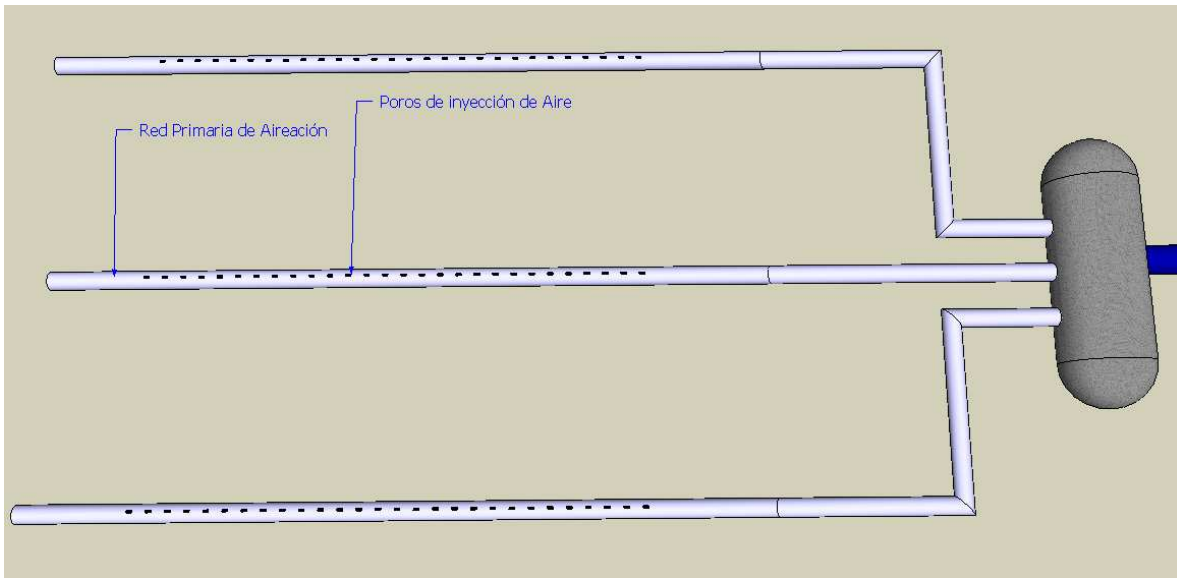


Figura 1.4: Infraestructura de aireación en una pila de biolixiviación [18,19].

Por ello la idea base de este trabajo de título es mezclar el aire y el vapor, provocando aire saturado en vapor e inyectarlo dentro de la pila utilizando esta infraestructura de aireación.

Otra gran interrogante que también existe es ¿cómo generar este vapor?, y la respuesta que se estudiará en este trabajo de título, es la generación de vapor basada en energía solar, lo que satisface a razones de calibre económico y medio ambiental.

### 1.3.2 Tecnología Solar

En resumen se quiere un sistema compuesto por paneles solares generadores de vapor, el cual se debe mezclar con el aire utilizando el sistema de aireación de una pila. Mezclando estos 2 últimos se busca obtener aire saturado en vapor, el cual deber ser inyectado a la pila de biolixiviación por la parte inferior de la pila, como se ilustra en la figura 1.5 y 1.6.

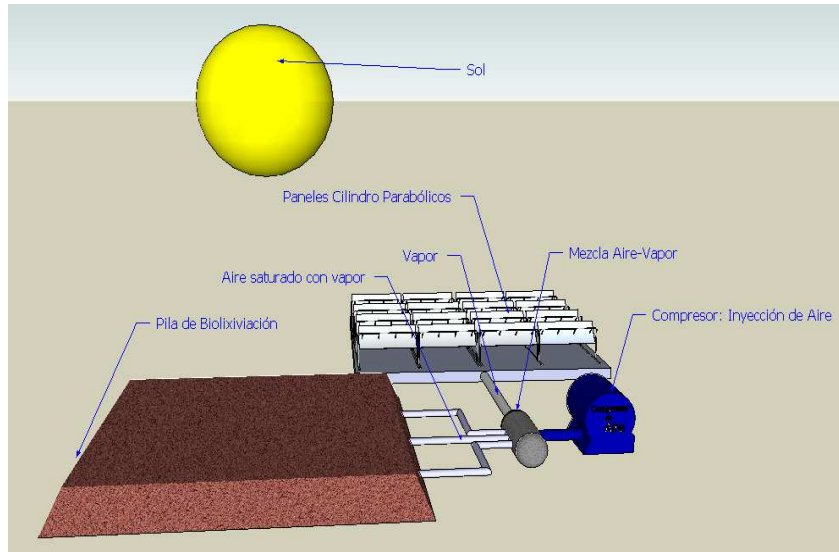


Figura 1.5: Montaje completo de idea para la aplicación industrial [18].

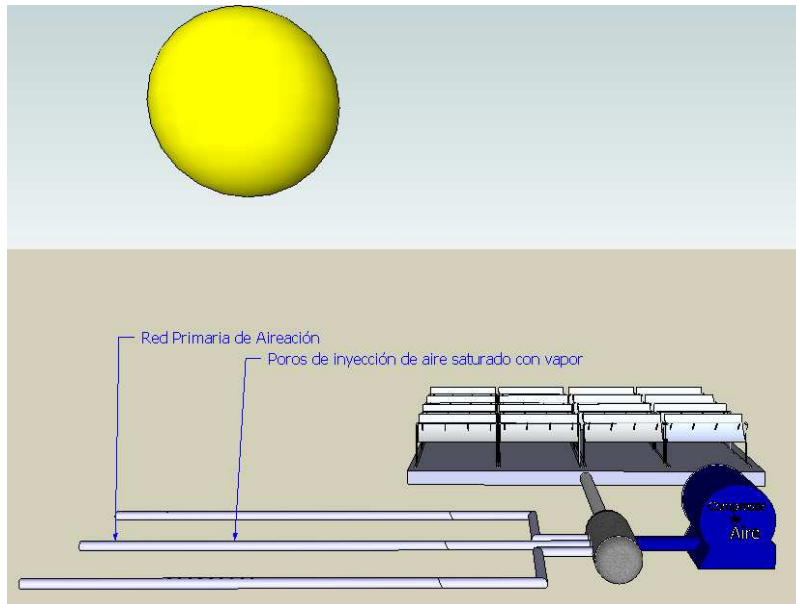


Figura 1.6: Red de aireación en la aplicación industrial [18].

La tecnología solar a utilizar, es de carácter termosolar, de tecnología cilindro parabólica. Esta tecnología consiste en espejos curvos colocados en zonas donde estos puedan recibir, direccionar y concentrar la radiación solar. Estos espejos de geometría parabólica, reflejan la radiación solar a un tubo ubicado en el foco de esta parábola. A través de este tubo circula un fluido térmico (típicamente un aceite con buenas propiedades convectivas de calor), el cual se calienta llegando a altas temperaturas. Este fluido es bombeado a un evaporador, en donde el calor almacenado en este fluido se transfiere al agua del evaporador, generando vapor que satisface necesidades de variadas industrias, específicamente en nuestro caso una necesidad de la industria minera. Lo explicado anteriormente, se encuentra ilustrado en la figura 1.7.



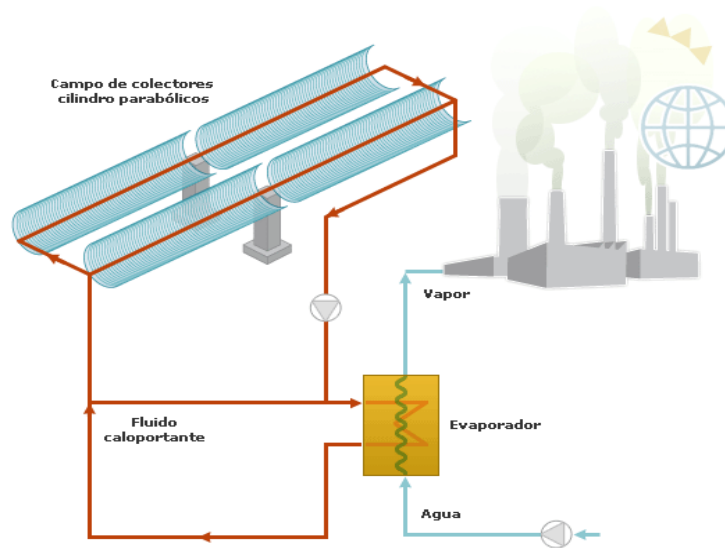


Figura 1.7: Tecnología termosolar, cilindro parabólica [20].

## 1.4 Tecnología cilindro parabólica

Con el fin de obtener altas temperaturas en conjunto con una buena eficiencia, es necesario utilizar colectores solares de alta tecnología. Sistemas de estructuras livianas y de bajo costo tecnológico para procesar temperaturas arriba de 400 °C, es lo que puede ser obtenido con colectores solares cilindro parabólicos, PTC (Parabolic Trough Collector, de su abreviación inglesa). Con esta tecnología es posible obtener temperaturas de entre 50 a 400 °C [21].

Los PTC son construidos a partir de una lámina metálica de superficie con alta reflexividad (generalmente láminas de vidrio recubiertas en plata o fabricadas a partir de aluminio pulido), la cual es doblada en forma parabólica. Típicamente un fluido de una sola fase (fluido calor-portante) fluye a través de un tubo negro metálico, el cual tiene la función de ser el receptor de la radiación reflejada por la lámina metálica. Este tubo está cubierto por un segundo tubo, el cual está fabricado por vidrio (Boro-Silicato). En el espacio intermedio entre estos dos tubos, se genera un vacío, con el objetivo de disminuir pérdidas de calor por convección. Estos tubos son instalados en el punto focal de la parábola, generada a partir de la lámina metálica. Finalmente todo el sistema mencionado anteriormente es soportado por pedestales, en los cuales existe un eje horizontal que soporta la parábola con los tubos. Este eje, comúnmente esta automatizado con un sistema de seguimiento del sol, el cual se encarga de mover todo el montaje entorno a la trayectoria diaria del sol. La figura 1.8 resume el montaje descrito anteriormente.

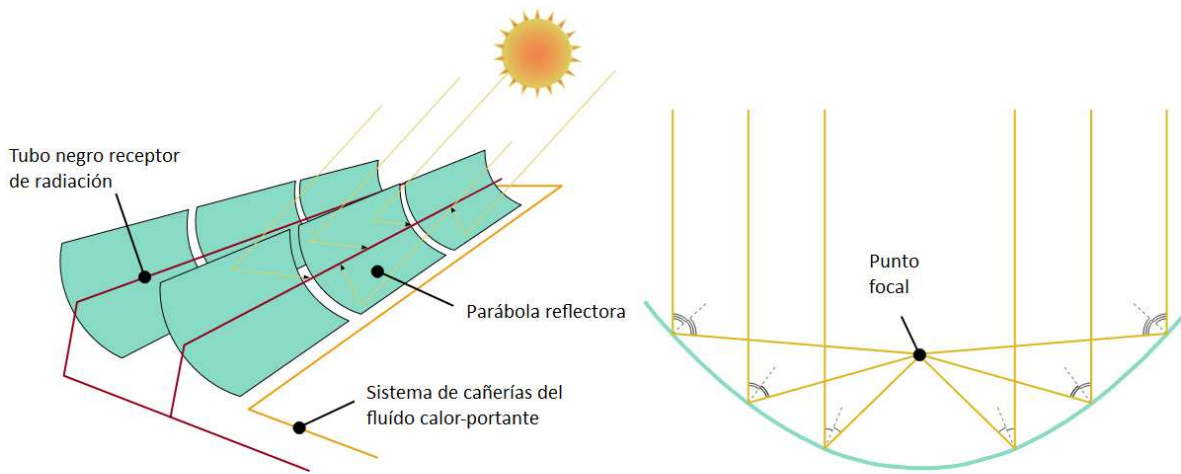


Figura 1.8: Diagrama de sistema solar cilindro parabólico [22].

La tecnología solar de PTC es la principal tecnología que actualmente se utiliza en las plantas eléctricas termosolares. Pero también es utilizada a nivel industrial en la generación de vapor, destilación de agua de mar, etc. [23]. La imagen 1.4 da una perspectiva real de estos equipos.



Imagen 1.4: Paneles cilindro parabólicos en el desierto de Negev, Israel [24].

## 1.5 Mecanismos de la biolixiviación

Como se ha mencionado anteriormente en la sección 1.1.3, el mecanismo de la biolixiviación, se basa en una reacción catalizada por microorganismos, Reacción 1.1. En esta reacción tiene lugar la oxidación del ión ferroso a ión férrico, lo que aumenta la concentración de ión férrico en el medio. En la sección 1.1.4, se explica que los microorganismos típicos de la biolixiviación de minerales cupríferos, son los *Acidithiobacillus ferrooxidans*, el cual se encuentra representado en la figura 1.9.

Se sabe que estas reacciones (Reacción 1.1, Reacción 1.2, Reacción 1.3) tienen lugar en la membrana celular de estos microorganismos. Los electrones de la oxidación del ión ferroso pasan a la matriz celular, en donde son utilizados en un proceso bioquímico produciendo energía para el microorganismo. Además durante este proceso bioquímico, se reducen moléculas de oxígeno a moléculas de agua. Este mecanismo se ilustra en la figura 1.9 [15].

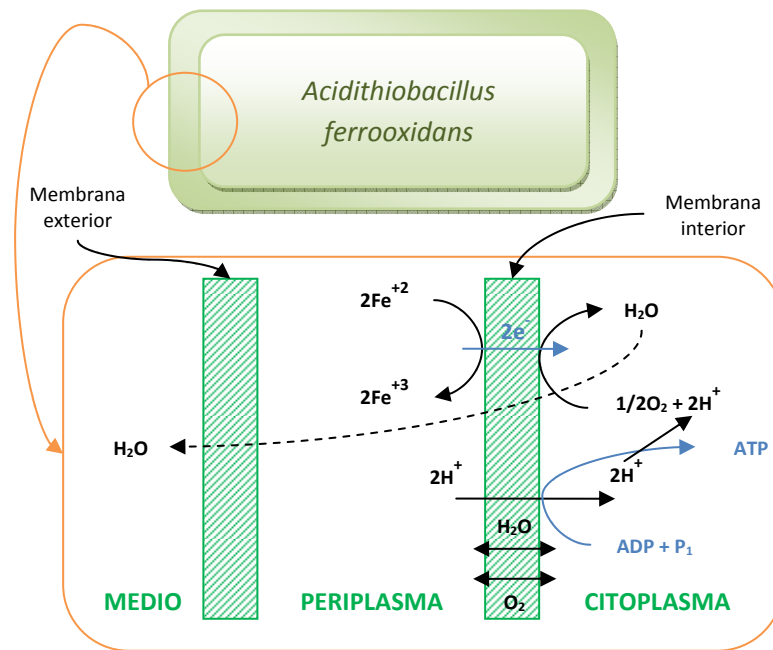


Figura 1.9: Esquema del mecanismo en un *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

El azufre elemental producido de la reacción 1.2 (Reacción 1.2), es también oxidado por microorganismos presentes en una pila, tales como la *Acidithiobacillus ferrooxidans* [25] y *Sulfobacillus* [26]. Lo que concluye con la producción del ácido sulfúrico de la Reacción 1.3.

La recuperación de cobre desde minerales descartados en las operaciones mineras convencionales, se produce en forma natural en estos sitios de descarte mineral, gracias a la acción de microorganismos inherentes a dichos minerales [27]. De esta forma, las operaciones de lixiviación de minerales sulfurados que presentan una cinética lenta en comparación con la lixiviación de minerales oxidados de cobre, se vuelven rentables, dado que la biolixiviación en botaderos y pilas no representan una gran inversión, por el hecho de ser un producto de desecho del procesamiento de minerales de alta ley.

## 1.6 Modelamiento para pilas de biolixiviación

En el momento en el que se quiere realizar un modelo que represente el comportamiento del calor en el interior de una pila de biolixiviación, se hace necesario definir el volumen de control, que representará a la pila de biolixiviación a estudiar. La literatura informa que la metodología clásica al estudiar una pila de biolixiviación, corresponde a considerar el material de la pila como un material poroso [4,11,15,16,19]. Es decir, se considera que en la pila existen 3 fases presentes, una fase sólida correspondiente a la roca compuesta de óxidos y sulfuros de cobre, la fase líquida correspondiente a los ácidos irrigados por la parte superior de la pila y una última fase gaseosa, que corresponde la mezcla aire-vapor que es aireado por la parte inferior de la pila, gracias al sistema de aireación. Es así como se define un volumen de control (o volumen elemental representativo, como se muestra en la figura 1.10), del cual su fracción porosa corresponde a la fase líquida y gaseosa, y su fracción no porosa a la fase sólida. La figura 1.10, ilustra lo explicado anteriormente.

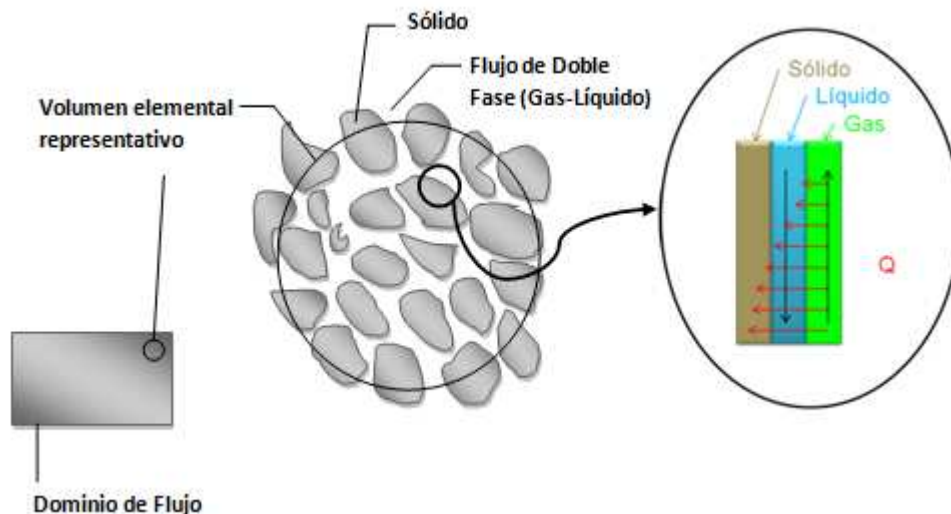


Figura 1.10: Modelo básico de un material poroso [28].

Inmediatamente después de tener definido el cuerpo que se va a estudiar, se realiza una determinación de los fenómenos presentes en este proceso. La enumeración de estos fenómenos es la siguiente:

1. Calor sensible entregado por el aire caliente a la fase líquida correspondiente al líquido de irrigación.
2. Calor latente entregado por el aire caliente a la fase líquida correspondiente al líquido de irrigación. Este calor latente viene de la condensación del vapor en la mezcla aire-vapor.
3. Transferencia de masa del agua en la interfase aire-líquido.
4. Calor sensible entregado por el líquido irrigado al sólido.
5. Calor de reacción liberado por las reacciones químicas que son catalizadas por los microorganismos, que tienen lugar en las fases sólida y líquida.

6. Calor consumido por la reproducción, transporte y crecimiento de los microorganismos.

La lista resultante es extensa, y podría serlo más aun, pero es por esto, que en esta primera etapa, los puntos 1, 2 y 3 han sido los elegidos a estudiar [28], estos se resumen en una transferencia de calor y masa entre las fases gaseosa y líquida, además el punto 4 corresponde a la transferencia de calor entre la fase líquida y sólida. Esto último se muestra esquemáticamente en la figura 1.11.

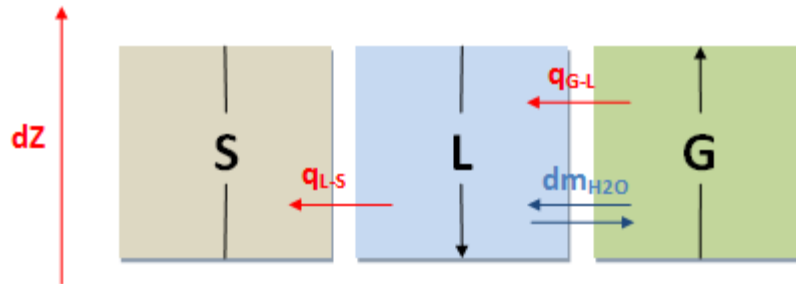


Figura 1.11: Esquema de los fenómenos de transferencia presentes las 3 fases presentes en el volumen de control ( $dz$ ) de una pila de biolixiviación.

En la figura 1.11, es posible apreciar la existencia de transferencia de masa de agua y de calor desde la película de gas, hasta la película líquida. Esto es lo que se conoce como un proceso de deshumidificación de un gas, lo que será explicado en la sección a continuación.

### 1.6.1 Proceso de Deshumidificación

El contacto de una mezcla templada de un aire humidificado con un líquido frío (en relación a la mezcla gas-vapor) produce la condensación del vapor. En el estudio correspondiente a esta memoria de título se trabaja con una mezcla aire-vapor, en la cual, la idea principal es transferir calor sensible y calor latente desde la fase gaseosa a la fase líquida. Además se busca determinar la importancia de la transferencia de masa de agua a esta fase líquida, correspondiente a la condensación del vapor en la mezcla aire-vapor. La figura 1.12 describe este fenómeno [29].

Los procesos de deshumidificación (y humidificación) de gases, son particularmente interesantes debido a que en ellos se presenta una transferencia simultánea de calor y masa. Este hecho generalmente complica el análisis y la matemática que existe en este proceso, en comparación con la existente en los procesos típicos de transferencia de masa y calor comunes en absorción, diálisis, destilación, etc. Pero al igual que en estos procesos, en la deshumidificación la dirección de la transferencia y el alcance de esta misma, se encuentran controlados por la condición de equilibrio hacia la cual tiende la transferencia. Por tanto, es necesario establecer el equilibrio de fases (correspondiente al presente en la interfase existente entre la fase líquida y la gaseosa) como una base para la aplicación de las ecuaciones de transferencia.

Para poder comprender las ecuaciones de transferencia de masa y calor de un proceso típico de deshumidificación (y análogamente humidificación), es necesario comprender los conceptos

básicos que existen detrás de esta teoría, por lo que a continuación, se pretende realizar una breve descripción de éstos.

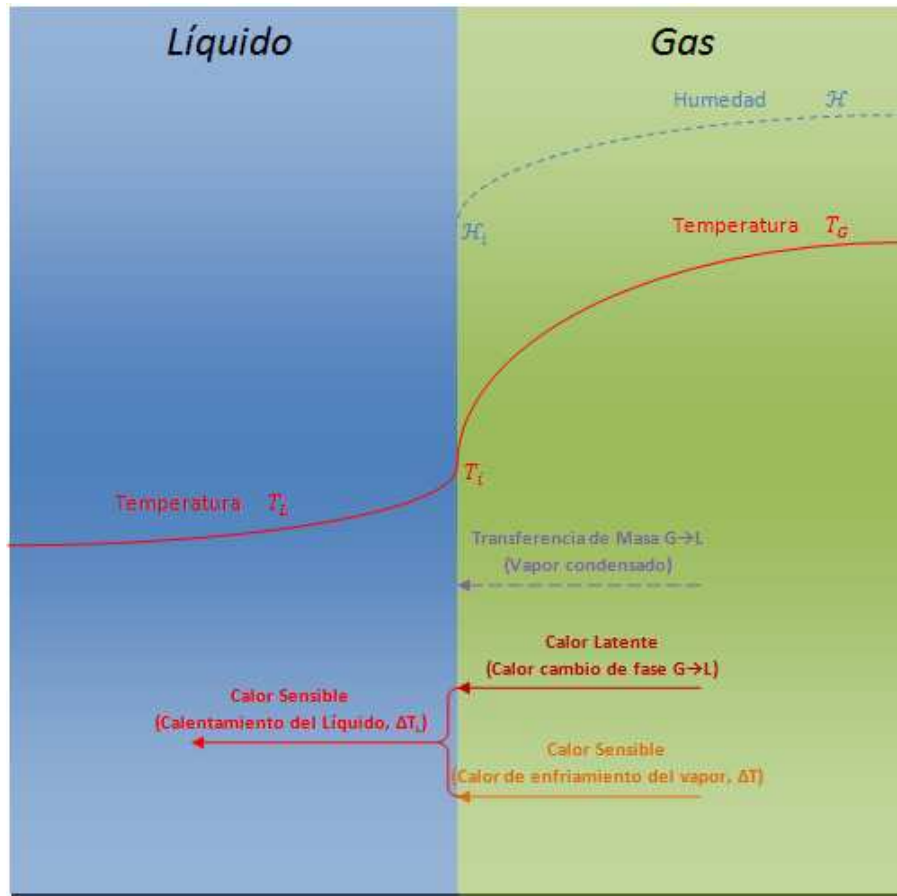


Figura 1.12: Fenómenos de Transferencia de Masa y Energía, presentes en un proceso de Deshumidificación de un gas [30].

A continuación, el término vapor se aplicará a la sustancia, designada por sustancia A, que en el estado de vapor está relativamente cerca de su temperatura de condensación a la presión dominante (agua en este caso). El término gas<sup>2</sup> se aplicará a la sustancia B, la cual es un gas relativamente bastante sobrecalentado (aire en este caso). Para mayor detalle en la notación, revisar capítulo de Nomenclatura.

<sup>2</sup> En esta memoria se hablará de gas y aire de manera equivalente.

### 1.6.1.1 Humedad Absoluta

La relación masa de vapor / masa de gas, es la humedad absoluta, denotada como  $Y'$ . Si las cantidades se expresan en moles, la relación es la humedad molal absoluta, denotada como  $Y$ .

$$Y = \frac{\bar{p}_A}{\bar{p}_B} = \frac{\bar{p}_A}{p_t - \bar{p}_A} \left[ \frac{\text{moles A}}{\text{moles B}} \right]$$

(Ec. 1.2)

$$Y' = \frac{\bar{p}_A}{\bar{p}_B} \cdot \frac{M_A}{M_B} = \frac{\bar{p}_A}{p_t - \bar{p}_A} \cdot \frac{M_A}{M_B} \left[ \frac{\text{masa A}}{\text{masa B}} \right]$$

(Ec. 1.3)

En muchos aspectos, la relación molal es la más conveniente, debido a la facilidad con la cual pueden interrelacionarse moles y volúmenes mediante la ley de gases ideales. No obstante, la relación de masa se ha establecido firmemente en la bibliografía sobre la humidificación, y es esta relación de masa la utilizada en el trabajo de esta memoria de título.

### 1.6.1.2 Mezclas de agua-aire saturadas

Si aire seco insoluble B se pone en contacto con suficiente agua A, el agua se evaporará en el aire hasta que finalmente, en el equilibrio, la presión parcial de A ( $\bar{p}_A$ ) en la mezcla aire-vapor alcanza su valor de saturación, la presión de vapor  $p_A$  a la temperatura dominante. La presión parcial de vapor en la mezcla saturada será independiente de la naturaleza del gas y la presión total (excepto a presiones muy elevadas); sólo depende de la temperatura e identidad del líquido. Sin embargo, la humedad molal absoluta a saturación ( $Y_s$ ) depende de la presión total; la humedad absoluta a saturación ( $Y'_s$ ) dependerá también de la identidad del gas. Las dos humedades saturadas se vuelven infinitas en el punto de ebullición del líquido a la presión total dominante.

$$Y' = \frac{p_A}{p_t - p_A} \cdot \frac{M_A}{M_B} \left[ \frac{\text{masa A}}{\text{masa B}} \right]$$

(Ec. 1.4)

### 1.6.1.3 Mezclas de vapor-gas no saturadas

Si la presión parcial del vapor en una mezcla de gas-vapor es por alguna razón menor que la presión de vapor en el equilibrio del líquido a la misma temperatura, se dice que la mezcla no está saturada.

### 1.6.1.4 Temperatura de bulbo seco

Es la temperatura de una mezcla gas-vapor, determinada por la forma ordinaria de inmersión de un termómetro en la mezcla gaseosa.

### 1.6.1.5 Temperatura de bulbo húmedo

Es la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de mezcla gas-vapor no saturada. Inicialmente la temperatura del bulbo húmedo es mayor que la temperatura del bulbo seco, por lo que el líquido presente en la gaza del termómetro comienza a disminuir su temperatura, como se supone un proceso adiabático, este calor sensible se transforma en calor latente que evapora una porción del líquido en la gaza. El vapor generado por el bulbo húmedo, es tan pequeño en comparación con la mezcla gas-vapor, que su efecto en la humedad de este se considera despreciable. Una vez que la temperatura del bulbo húmedo es menor que la del bulbo seco, comienza transferencia de calor desde el gas hacia el líquido presente en el bulbo húmedo. Es así como se llega a un estado dinámico estacionario, en el cual el calor latente utilizado para la evaporación de líquido en el bulbo húmedo, es equivalente al calor sensible que entrega la mezcla de gas-vapor. Cumpliéndose estas condiciones, se dice que en este punto, la temperatura del bulbo húmedo es similar a la temperatura de rocío del gas y particularmente para la mezcla de aire-vapor, debido a que se cumple que el número de Lewis es la unidad [29], (el número de Lewis representa la relación entre la difusividad térmica y la molecular, cuando el número de Lewis es la unidad, quiere decir que la difusividad térmica y la molecular son idénticas) se asevera que la temperatura del bulbo húmedo es igual a la temperatura de rocío del vapor. Es por esto último que para mezclas aire-vapor, es posible decir que la temperatura del bulbo húmedo es equivalente a la temperatura de saturación adiabática de la mezcla aire-vapor y que en condiciones apropiadamente controladas, dicha temperatura puede utilizarse para medir la humedad de la mezcla.

### 1.6.1.6 Saturación relativa

La saturación relativa, llamada también humedad relativa y expresada como un porcentaje, se define como  $100 \bar{p}_A / p_A$ , en donde  $p_A$  es la presión de vapor a la temperatura de bulbo seco de la mezcla gas-vapor. Para cualquier vapor, la representación gráfica de las condiciones de saturación relativa constante puede construirse fácilmente sobre una carta de presión de vapor-temperatura, como en la figura 1.13 (a). Por lo tanto, la curva para el 50% de saturación relativa muestra una presión de vapor parcial igual a un medio de la presión de vapor en el equilibrio (100% de saturación) a cualquier temperatura.

### 1.6.1.7 Punto de rocío

Temperatura a la cual se comienzan a apreciar las primeras micro-gotas del líquido A que condensan en la mezcla vapor-gas. A esta temperatura la mezcla se dice está en un estado de saturación, el cual se obtiene gracias al enfriamiento de la mezcla gas-vapor a presión constante. En la figura 1.13 (b), se muestra la temperatura del punto de rocío ( $T_{PR}$ ) de un gas (línea verde), el cual parte de un punto C donde se enfría a presión constante, sin contacto con un líquido y llega hasta el punto de rocío E. Esto quiere decir que para todas las mezclas de humedad absoluta  $Y'_1$ , se tienen el mismo punto de formación de rocío.



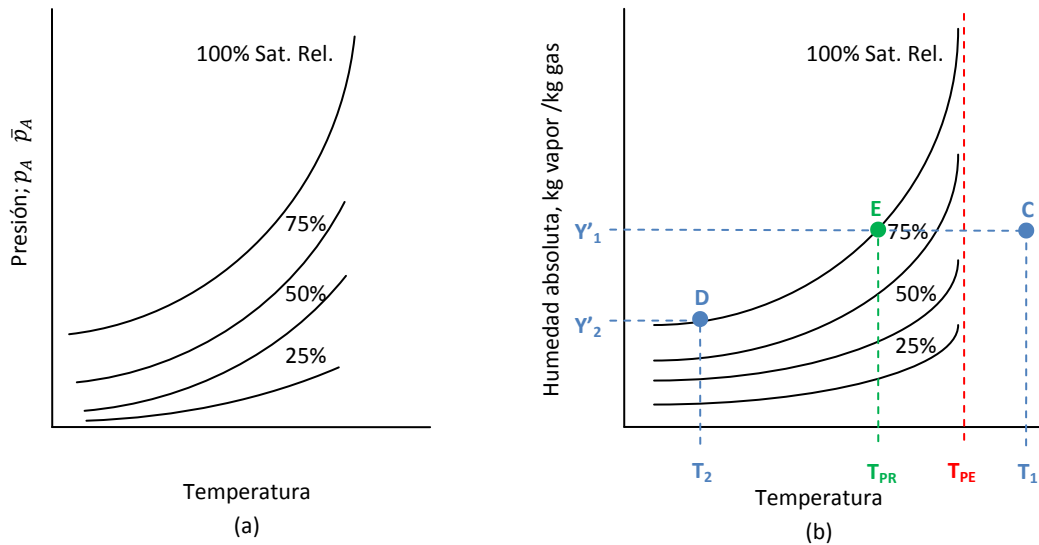


Figura 1.13: Estructuras de cartas psicrométricas.

### 1.6.1.8 Volumen húmedo

El volumen húmedo  $v_H^3$  de una mezcla gas-vapor, es el volumen de masa unitaria de gas seco y de su vapor acompañante a la temperatura y presión dominantes. Para una mezcla de humedad absoluta  $Y'$  en  $T_G$  y  $p_T$ . La ley de los gases ideales resume el volumen húmedo en la Ec. 1.5.

$$v_H = 22.41 \left( \frac{1}{M_B} + \frac{Y'}{M_A} \right) \frac{T_G + 273}{273} \cdot \frac{1.013 \cdot 10^5}{p_T}$$

(Ec. 1.5)

### 1.6.1.9 Calor húmedo

El calor húmedo  $C_{PS}$  es el calor que se requiere para aumentar la temperatura de la masa unitaria del gas y su vapor acompañante en 1 °C a presión constante, para una mezcla de humedad absoluta  $Y'$ .

$$C_{PS} = C_{PB} + Y' C_{PA}$$

(Ec. 1.6)

### 1.6.1.10 El sistema aire-agua

Mientras que pueden prepararse cartas psicrométricas para cualquier mezcla gas-vapor, cuando las circunstancias lo exigen, el sistema aire-vapor (aire-agua) aparece con tanta frecuencia

<sup>3</sup> Para el detalle de las unidades, revisar capítulo de nomenclatura.

que se cuenta con cartas excepcionalmente completas para estas mezclas. La figura 1.14, muestra una carta para el sistema aire-agua.

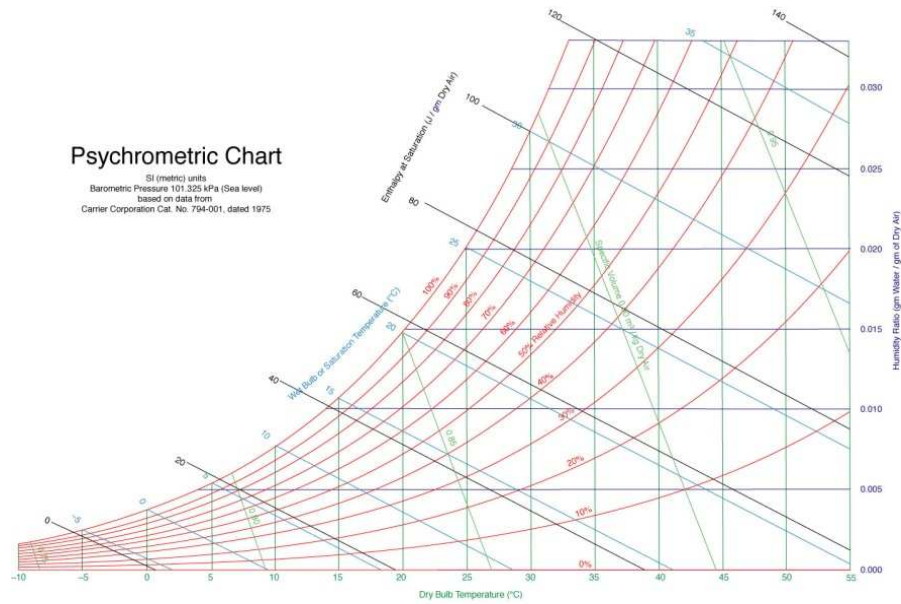


Figura 1.14: Carta psicrométrica para aire-vapor, 1 atm estándar. En unidades SI.

En la figura 1.12, se ilustra el caso de deshumidificación de la mezcla aire-vapor, que concierne a esta memoria de título. En donde una mezcla sobrecalentada de aire-vapor se inyecta por la parte inferior de una pila de biolixiviación y donde simultáneamente a esto una solución líquida es irrigada por la parte superior de la pila, es decir, se tiene una fase gaseosa y una fase líquida, las cuales se encuentran intercambiando masa y calor en contracorriente, como muestra la figura 1.15. Además la figura 1.13 (b), ilustra los puntos termodinámicos correspondiente a la deshumidificación del gas, en donde un gas a partir un punto C no saturado, se enfría y deshumidifica hasta llegar al punto D. En donde  $T_1 - T_2$  representa la pérdida de calor sensible de este gas y  $Y'_1 - Y'_2$  representa el grado de deshumidificación de la mezcla y su correspondiente pérdida de calor latente.

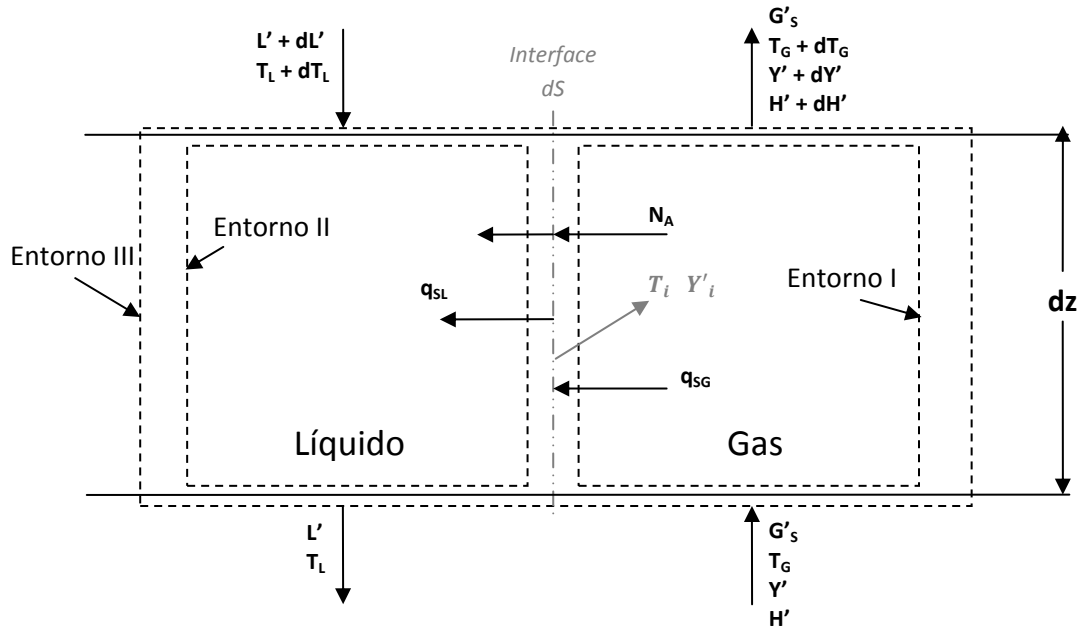


Figura 1.15: Sección diferencial de la transferencia entre una fase gaseosa y una líquida.

#### 1.6.1.11 Transferencia de Masa

La transferencia de masa es modelada utilizando las ecuaciones correspondientes a lechos rellenos típicos de operaciones en torres empacadas. Para el caso estudiado en esta memoria de título, la transferencia de masa corresponde al vapor de la fase gaseosa que se puede condensar, y/o también al agua de la fase líquida, que se puede evaporar. Esto último es lo que define hacia qué dirección va la transferencia de masa. La rapidez de esta, es generalmente pequeña y para el estado estacionario queda descrita por las (Ec. 1.7 - 1.10).

$$G'_s \frac{dY'}{dz} = -k_Y a (Y' - Y'_i) \quad (\text{Ec. 1.7})$$

$$\frac{dY'}{dz} = -\frac{M_A F_G a}{G'_s} \ln \left( \frac{1 - p_{A,i}/p_T}{1 - p_{A,G}/p_T} \right) \quad (\text{Ec. 1.8})$$

$$\frac{F_G \cdot Sc_G^{2/3}}{G_S} = 1.195 \left[ \frac{d_s \cdot G'_s}{\mu_G (1 - \varepsilon_{Lo})} \right]^{-0.36} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

$$G_S = \frac{G'_S}{M_B}$$

(Ec. 1.10)

También para la resolución de las ecuaciones de transferencia de masa, es necesario utilizar la ecuación de balance de material, correspondiente al diferencial de “dz”.

$$L' + dL' + G'_S(1 + Y') = L' + G'_S(1 + Y' + dY')$$

$$dL' = G'_S dY'$$

(Ec. 1.11)

### 1.6.1.12 Transferencia de Calor

Al igual que la transferencia de masa, la transferencia de calor es modelada por medio de la teoría de lechos rellenos, típicos de operaciones en torres empacadas. Estas ecuaciones nacen de los balances de entalpía correspondientes a las fases gaseosa y líquida, y al comportamiento global del sistema.

**Entorno I** (Fase Gaseosa, Figura 1.15):

$$\{\text{Flujo de entalpía a la entrada}\} = G'_S H'$$

(Ec. 1.12)

$$\{\text{Flujo de entalpía a la salida}\} = G'_S(H' + dH') - G'_S dY' [C_{PA}(T_G - T_0) + \lambda_0]$$

(Ec. 1.13)

Para la fase del gas es sencillo ver que:

$$\{\text{Flujo de entrada}\} - \{\text{Flujo de salida}\} = \{\text{rapidez de la transferencia de calor}\}$$

Utilizando las ecuaciones 1.12 y 1.13 se obtiene

$$-G'_S C_{PS} dT_G = h'_G a (T_G - T_i) dz$$

(Ec. 1.14)

**Entorno II** (Fase Líquida, Figura 1.15):

$$\{\text{Flujo de entalpía a la entrada}\} = (L' + dL')(T_L + dT_L - T_0)C_{PA,L} + (-G'_S dY')(T_i - T_0)C_{PA,L}$$

(Ec. 1.15)

$$\{\text{Flujo de entalpía a la salida}\} = L' C_{PA,L} (T_L - T_0)$$

(Ec. 1.16)

$$\{\text{Flujo de entrada}\} - \{\text{Flujo de salida}\} = \{\text{rapidez de la transferencia de calor}\}$$

(Ec. 1.15) y (Ec. 1.16):

$$L' C_{PA,L} dT_L = (G'_S C_{PA,L} dY' - h_L a dz)(T_i - T_L)$$

Generalmente, debido a que la masa de vapor transferido es muy pequeña, se hace posible ignorar el calor sensible del vapor transferido, lo que deja a la ecuación anterior en lo siguiente.

$$L' C_{PA,L} dT_L = h_L a (T_L - T_i) dz$$

(Ec. 1.17)

**Entorno III** (Global para un diferencial de altura, Figura 1.15):

$$\{\text{Flujo de entalpía a la entrada}\} = G'_S H' + (L' + dL')(T_L + dT_L - T_0) C_{PA,L}$$

(Ec. 1.18)

$$\{\text{Flujo de entalpía a la salida}\} = L' C_{PA,L} (T_L - T_0) + G'_S (H' + dH')$$

(Ec. 1.19)

Suponiendo una operación adiabática, con las ecuaciones 1.18 y 1.19, se obtiene

$$\{\text{Flujo de entrada}\} = \{\text{Flujo de salida}\}$$

$$L' C_{PA,L} dT_L = G'_S \{C_{PS} dT_G + [C_{PA}(T_G - T_0) - C_{PA,L}(T_L - T_0) + \lambda_0] dY'\}$$

(Ec. 1.20)

Es así como con de las ecuaciones 1.7 - 1.20 aplicadas a operaciones adiabáticas, definen un modelo clásico, para el estudio de procesos de humidificación y deshumidificación, en estado estacionario.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivos generales**

1. Evaluar el calentamiento interno en una pila de biolixiviación, por medio del calentamiento y humidificación del aire de entrada a través del sistema de aireación de esta.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Resolver ecuaciones de transferencia de masa y calor para estado estacionario, entre las fases líquida y gaseosa, presentes en una pila de biolixiviación.
2. Estudiar la influencia de variaciones de temperatura de la mezcla aire-vapor.
3. Estudiar la influencia de variaciones a la razón L/G.
4. Estudiar la influencia de variaciones de humedad de la mezcla aire-vapor.
5. Obtener perfiles térmicos y de humedad a lo largo de una pila de biolixiviación.
6. Definir tipos de microorganismos presentes en cada escenario y asegurar su existencia.
7. Evaluar económicamente la instalación de un sistema generador de vapor a partir de paneles solares, los cuales satisfagan el calentamiento en el sistema de aireación.

### 3 Metodología

La metodología utilizada para lograr establecer el impacto del calentamiento y humidificación de la mezcla aire-vapor introducida por el sistema de aireación de una pila de biolixiviación, se resume en la carta de flujo de la figura 3.1 a continuación.

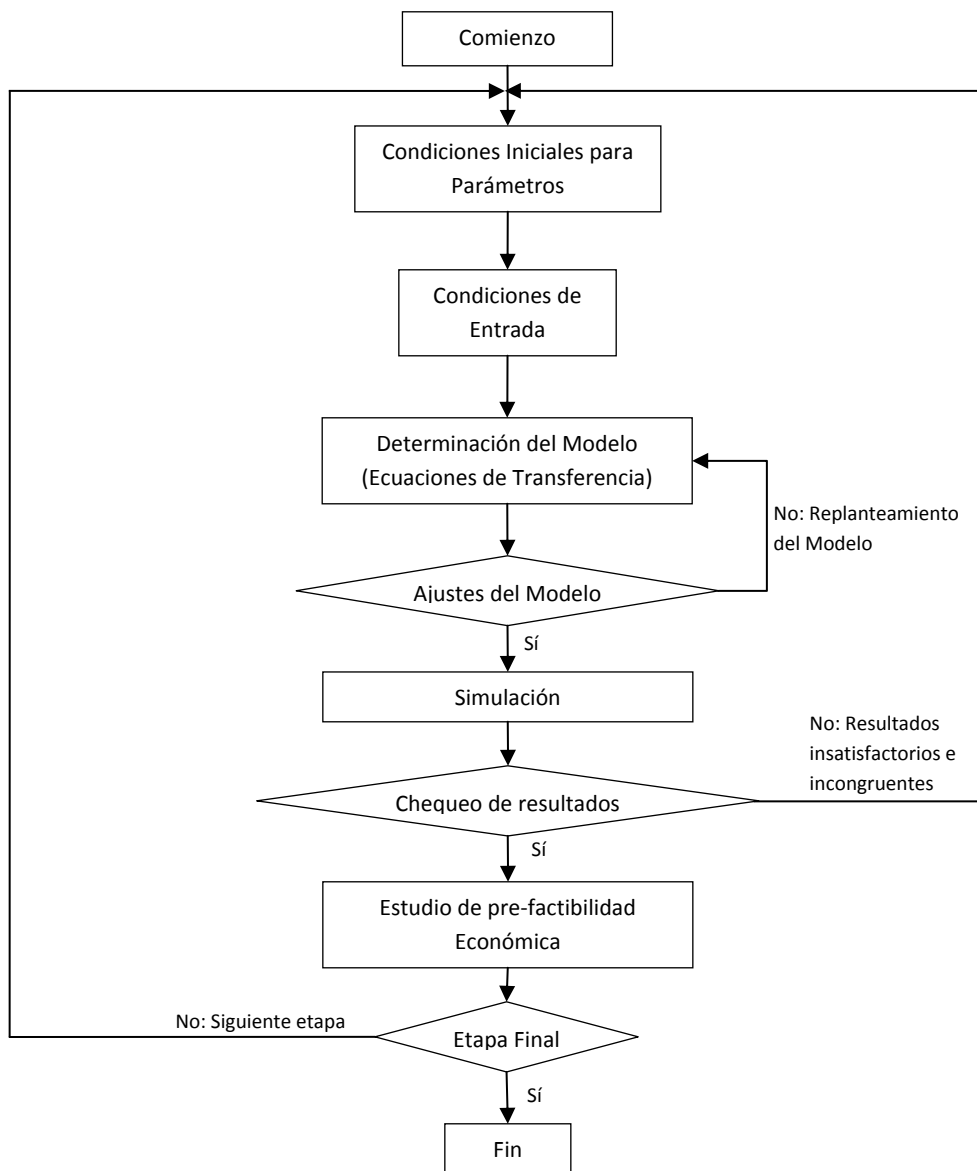


Figura 3.1: Carta de Flujo a seguir en el trabajo de título.

El detalle de las principales etapas presentes en la carta de flujos de la figura 3.1, se presenta a continuación.

1. Condiciones iniciales para parámetros: Se definen parámetros fijos para la pila de biolixiviación a ser estudiada. Ver tabla 4.1.
2. Condiciones de entrada: Se definen variables específicas a estudiar, para medir la sensibilidad del modelo. Se eligieron la temperatura de entrada de la mezcla aire-vapor y la humedad de entrada de esta, como las principales variables a observar en su comportamiento.
3. Determinación del modelo: Como ya se ha definido anteriormente, una pila de biolixiviación comúnmente es estudiada dándole características de un lecho relleno, tales como porosidad, tamaños y formas específicas de partículas, entre otras. Las torres empacadas, poseen algunas de estas características, aunque no todas. En las torres empacadas no existe intercambio de materia entre la fase líquida y la sólida, como sí ocurre en las pilas de biolixiviación. Pero los fenómenos de transferencia entre las fases gas y líquido en una torre empacada, son muy similares a los que ocurren entre estas mismas fases dentro de una pila de biolixiviación. Es por esto que se ha utilizado la teoría de transferencia de calor y masa, correspondiente a torres empacadas, para modelar el comportamiento entre las fases líquida y gaseosa de una pila de biolixiviación. En la figura 3.2 se ilustra esta analogía.

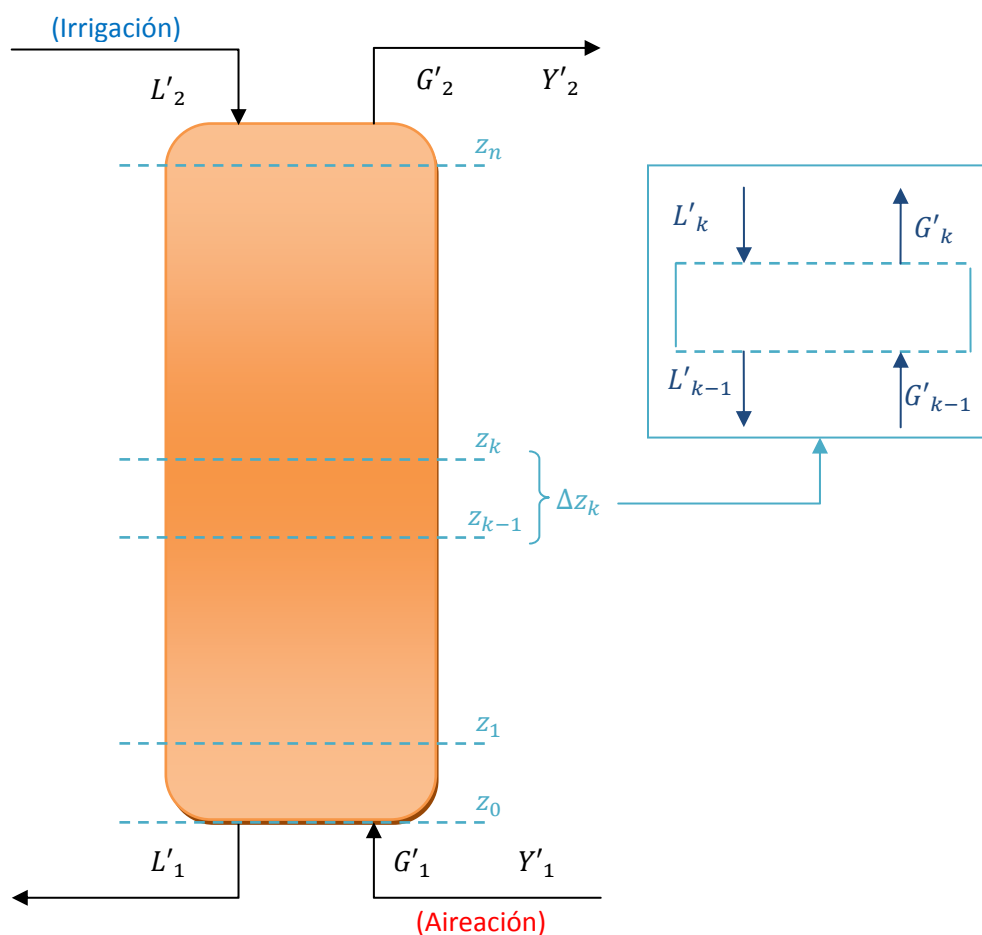


Figura 3.2: Ilustración del análisis diferencial finito, a lo largo de una pila de biolixiviación.



Una vez definido este modelo de diferencias finitas, el algoritmo tiene la función de resolver las ecuaciones 1.2 a la 1.20, para cada uno de los " $\Delta z_k$ " intervalos expuestos en la figura 3.2, cada uno de estos intervalos corresponde a una diferencia finita de los diferenciales presentados en la figura 1.15.

4. En el chequeo de resultados se vuelve al comienzo, cuando los resultados obtenidos son insatisfactorios e incongruentes, lo que equivale a decir que la simulación debe ser replanteada para los casos en donde no exista una correspondencia entre la simulación y la fenomenología que gobierna el proceso.
5. Estudio de pre-factibilidad económica: Traducir los resultados técnicos, a resultados económicos los cuales muestren distintos escenarios de inversión para plantas termosolares.

Dentro del resto de los principales factores a considerar, se encuentran los siguientes a considerar.

No se estudia el intercambio de calor entre las fases líquida y sólida. Esto se justifica, con que la fase más relevante a considerar corresponde a la líquida, ya que es la temperatura de esta la más representativa de la real temperatura de operación, que los microorganismos poseen durante el proceso.

Con respecto a las condiciones de borde, se establece una temperatura de 18 °C para la entrada superior de la fase líquida y una temperatura de salida de la fase gaseosa, no inferior a los 10 °C, se debe recordar, que este modelo calcula alturas de lechos rellenos con temperaturas de entrada y salida, de las fases líquida y gaseosa preestablecidas. Esto significa que para cada simulación, fue necesario iterar manualmente hasta lograr los 10 metros de altura de lecho relleno en cada simulación. Con lo que se obtuvo distintas temperaturas de salida inferior de la fase líquida y de salida superior de la fase gaseosa, para cada una de las simulaciones realizadas. Como se dijo al comienzo, un mínimo de 10 °C fueron aceptados en estas iteraciones, debido a que es físicamente incongruente que la temperatura del gas salga a una temperatura menor a la del medio ambiente de la faena minera, temperatura que se estima que en el menor de los casos sea 10 °C.

## 4 Resultados

En este capítulo se encuentran 3 set de simulaciones realizadas durante el trabajo de esta memoria de título. El primer set, corresponde a 10 simulaciones en donde se pretende ver el impacto en los perfiles de temperatura y humedad a lo largo de un lecho relleno de 10 metros de altura. En este primer set se utilizan tasas de aireación e irrigación correspondientes a las indicadas en la bibliografía para torres de desorción de gases, los detalles de este primer set se encuentran en la tabla 4.1. El segundo set, corresponde a 6 simulaciones en donde para un lecho relleno también de 10 metros de altura y con las mismas características del set anterior, con la diferencia que se utilizan tasas de aireación e irrigación con valores correspondientes a los de una pila de la minera Escondida, el detalle de las tasas se encuentra en la tabla 4.2. El tercer set, corresponde a 5 simulaciones en donde se aplica una mejora a la tasa de aireación utilizada por la pila de la minera Escondida, aumentando 10 veces su flujo.

### 4.1 Evaluación Técnica

En esta sección se estudia el primer set de simulaciones mencionadas anteriormente, para éstas 10 primeras simulaciones se utilizaron los parámetros expuestos en la tabla 4.1. Estas 10 simulaciones pueden ser divididas en 3 grupos en donde el primero corresponde a 2 simulaciones con la temperatura de entrada de la mezcla aire-vapor de 20 °C, un segundo grupo con una temperatura de entrada de la mezcla aire-vapor de 100 °C y finalmente un tercer grupo con la temperatura de entrada de la mezcla aire-vapor de 315 °C.

Parámetro	Valor	Unidades	Referencia
$T_{G1}$	20, 100, 315	°C	Asumidas
$T_{L2}$	18	°C	Asumida
$Y_1$	.00, .05, .08, .10 <sup>4</sup>	$kg\ vapor\ (kg\ aire)^{-1}$	Asumidas
$h$	10	$m$	Asumida
{ <i>tasa aireación</i> }	10,188	$m^3\ m^{-2}\ hr^{-1}$	Asumida
{ <i>tasa irrigación</i> }	12,060	$lt\ m^{-2}\ hr^{-1}$	Asumida
$M_A$ (Peso Molecular del agua)	18.02	$kg\ kmol^{-1}$	-
$M_B$ (Peso Molecular del aire)	28.97	$kg\ kmol^{-1}$	-
$C_{pA}$	1867 - 7900	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	Y. Cengel, [31].
$C_{pB}$	1005 - 1068	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	Engineering Tool Box, [32].
$C_{pA,L}$	4187	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	Y. Cengel, [31].
$C_{p_r}$	1172	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	J. Casas et al, [15].
$\mu_G$	1.82E-05 - 3.28E-05	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	Engineering Tool Box, [32].
$k_{th}$	.58 - .64	$W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	Y. Cengel, [31].
$\mu_L$	1.14E-03 - 5.47E-04	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	Y. Cengel, [31].
$Pr_L$	8.09 - 3.55	-	Y. Cengel, [31].
$p_{sat}$	.01 - 1	$atm$	Engineering Tool Box, [32].
$T_0$	18	°C	Asumida
$\lambda_0$	2.46E06	$J\ kg^{-1}$	Y. Cengel, [31].
$d_p$	.1	$m$	Asumido
$\varphi$	.65	-	Neuburg et al, [33].
$a$	20	$m^2\ m^{-3}$	Calculado
$\Delta T$	10	°C	Asumida
$\rho_r$	2700	$kg\ m^{-3}$	Bartlett, [5].
$Sc_G$	.61	-	Engineering Tool Box, [32].
$Pr_G$	.74	-	Engineering Tool Box, [32].

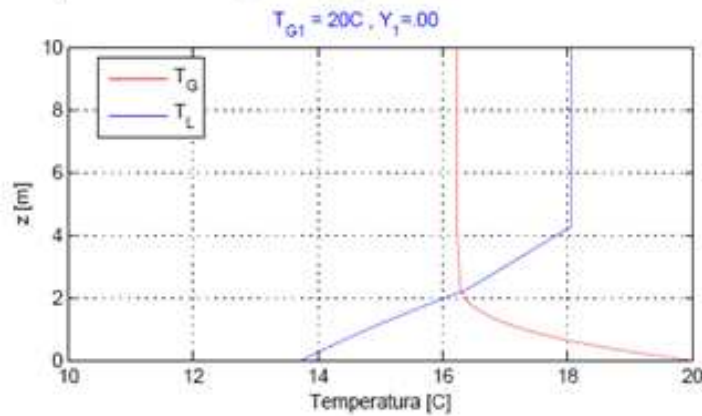
Tabla 4.1: Parámetros utilizados en todos los resultados.

#### 4.1.1 Temperatura de entrada aire-vapor de 20 °C

Primero, se buscó simular el comportamiento que existe actualmente en un lecho relleno con temperaturas y humedades de gas de entrada comunes en el procedimiento de aireación de una pila de biolixiviación. Los gráficos 4.1 y 4.2 muestran los perfiles de temperatura de la mezcla gaseosa y del líquido de irrigación, además de la humedad absoluta, a lo largo de 10 metros de lecho relleno. La mezcla gaseosa entra como aire seco en un comienzo.

<sup>4</sup> Excepcionalmente para el caso de  $T_{G1}=20^\circ C$ , se toman humedades absolutas de .00 y .01. El criterio utilizado al elegir estos valores, fue establecido por el suscrito en conjunto con el profesor guía de la comisión.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

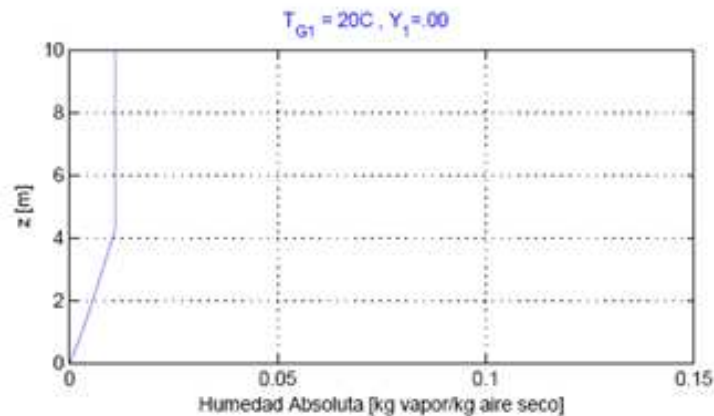


Gráfico 4.1: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 1.

Como es posible de observar en el gráfico 4.1, se aprecia una disminución en la temperatura de la mezcla gaseosa ascendente, además de una disminución en la temperatura del líquido descendente. Esto último equivale a una pérdida de calor sensible en ambas fases, además en la humedad absoluta se puede ver que esta pérdida de calor sensible por ambas fases se traduce en calor latente, el cual se encarga de generar vapor a lo largo del lecho mineral. También es posible ver un corte brusco a la altura de 4.50 metros, esto simplemente corresponde a que se alcanza el equilibrio psicrométrico para 4.50 metros, lo que corresponde a una transferencia de calor y masa nulas para los 5.50 metros restantes de lecho relleno. Es por esta razón que se considera razonable, detener la simulación a los 4.50 metros. Esto se justifica ya que el modelo matemático utilizado en la simulación, trabaja con ecuaciones de transferencia basados en gradientes de temperaturas, cuando la temperatura de la fase líquida llega a ser mayor a la temperatura de la fase gaseosa, el modelo pierde estabilidad, lo que genera resultados absurdos en la zona superior del lecho relleno. Para una mejor ilustración gráfica de los fenómenos involucrados, se continúa

con un comportamiento recto hasta los 10 metros, lo que presume una transferencia nula para el resto del mineral.

Un resumen de los fenómenos de transferencia presentados en este caso, se encuentra ilustrado en el anexo C, en la figura A3.1.

El estudio continúa analizando un segundo caso, en el cual se observa el comportamiento de los perfiles para el caso en el que se aumenta la humedad absoluta de entrada de la mezcla aire-vapor.

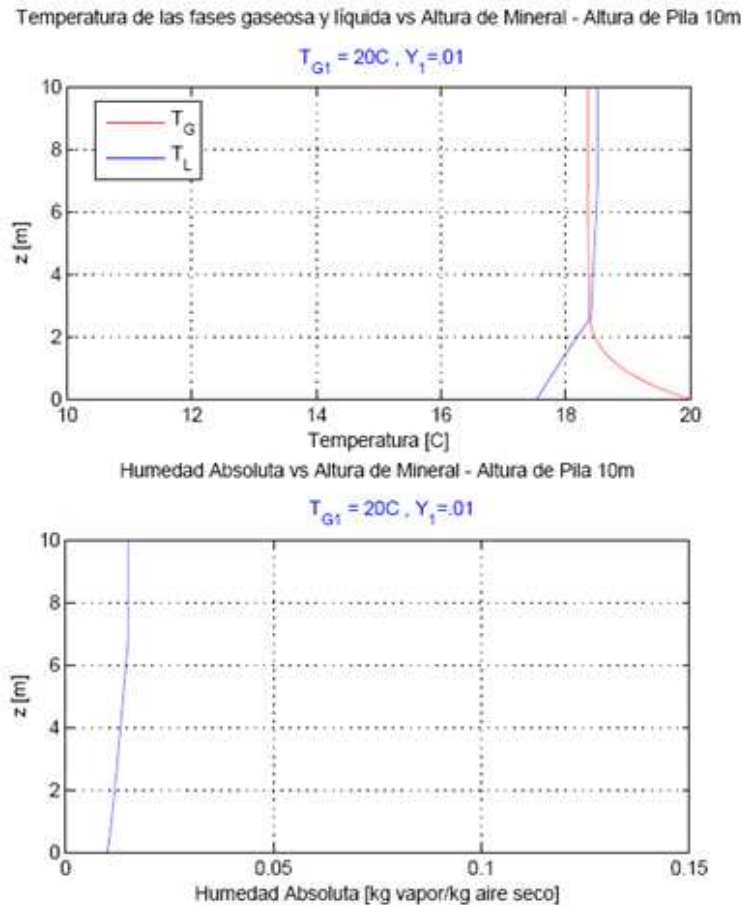


Gráfico 4.2: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 2.

Como es posible de observar del gráfico 4.2, se observa un comportamiento para este escenario cualitativamente igual al del caso anterior, presentado en el gráfico 4.1. Nuevamente se observa una pérdida de calor sensible de la mezcla gaseosa a lo largo de todo el lecho mineral, además de una pérdida del calor sensible de la fase líquida. Esta pérdida de calor sensible también se ve reflejada en un calor latente que humidifica levemente la mezcla aire-vapor a lo largo de la pila.

Sin embargo, en este caso es posible observarse que para el primer caso, la fase líquida se enfría hasta 13.73 °C. Mientras que en este segundo caso, la fase líquida solamente se enfría hasta los 17.54 °C.

#### 4.1.2 Temperatura de entrada aire-vapor de 100 °C

El estudio continúa analizando 4 casos en esta sección, en los cuales una variación de la humedad de entrada de la mezcla aire-vapor tiene lugar. Los 4 casos a continuación corresponden a una mezcla aire-vapor de entrada seca (Gráfico 4.3), una de humedad absoluta de 0.05 kg vapor/kg aire (Gráfico 4.4), una de humedad absoluta de 0.08 kg vapor/kg aire (Gráfico 4.5) y finalmente una de 0.10 kg vapor/kg aire (Gráfico 4.6).

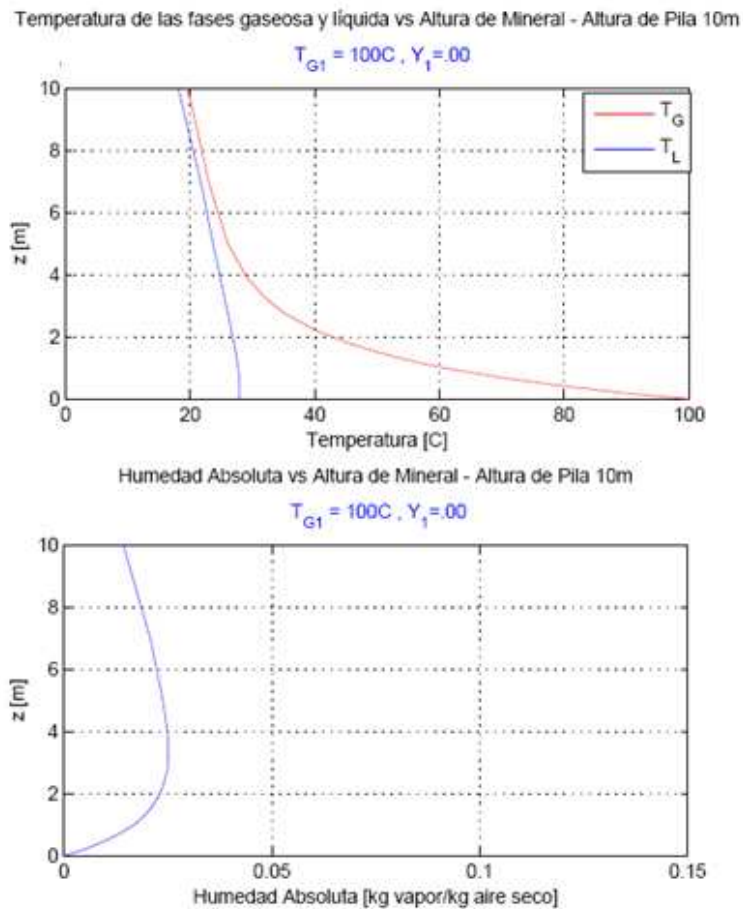
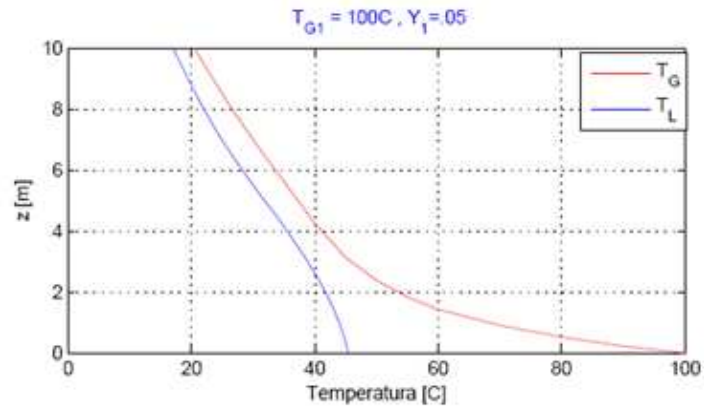


Gráfico 4.3: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 3.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

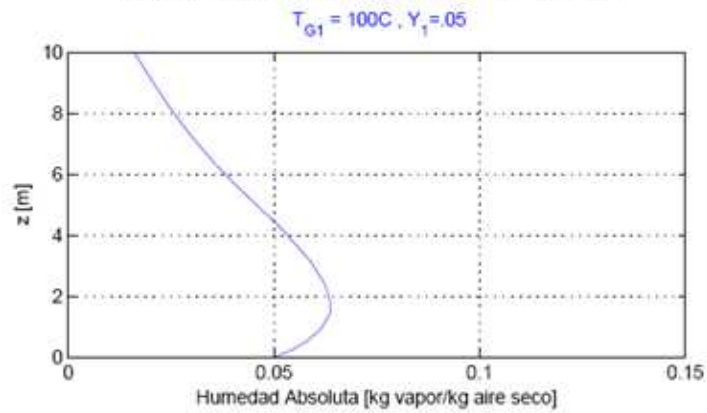
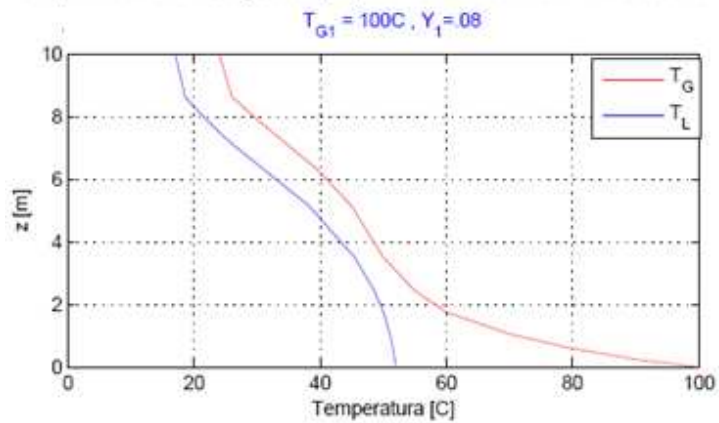


Gráfico 4.4: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 4.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

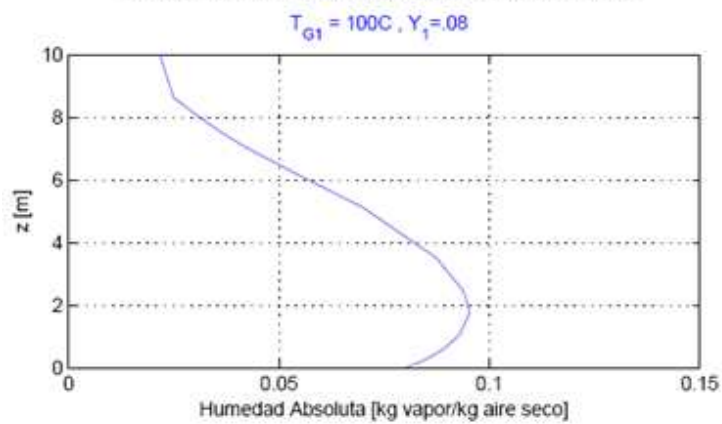
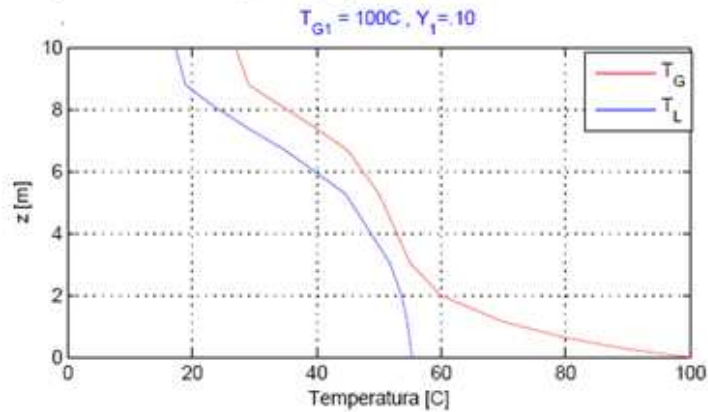


Gráfico 4.5: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 5.



Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

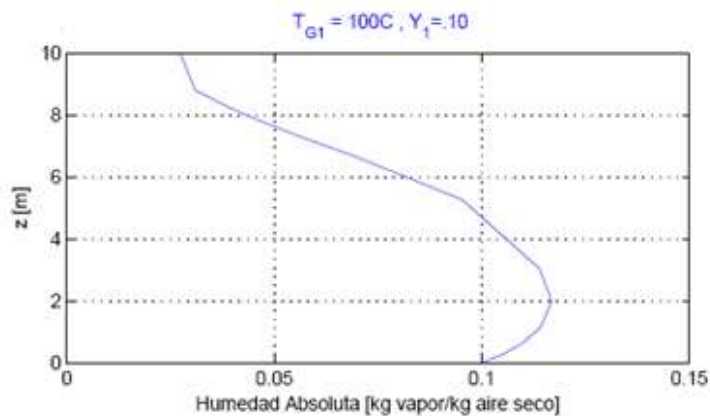


Gráfico 4.6: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 6.

En los gráficos 4.3 – 4.6, se muestra una pérdida de calor sensible por parte de la mezcla gaseosa y respectivamente una ganancia de calor sensible por parte de la fase líquida, además observa un patrón reiterativo con respecto a la humedad del gas, el cual se humidifica en los primeros metros de lecho mineral y posteriormente comienza un proceso de deshumidificación para el resto del lecho. Es posible observarse que a medida que aumenta la humedad absoluta de entrada de la mezcla aire-vapor, el perfil de temperatura de la fase líquida aumenta, es decir, se logra una mayor penetración del calor que transporta por fase gaseosa, generando perfiles de temperatura de la fase líquida mayores.

### 4.1.3 Temperatura de entrada aire-vapor de 315 °C

Finalmente se estudian los casos 7, 8, 9 y 10, correspondientes a una temperatura de entrada de la mezcla gaseosa de 315 °C, con las respectivas variaciones de humedades de los casos anteriores. Esto se realizó para poder analizar la importancia de trabajar con temperaturas extremas de la mezcla aire-vapor y poder determinar si son relevantes de estudiar a futuro. Los gráficos 4.7 – 4.10 presentan los resultados para estos últimos 4 casos.

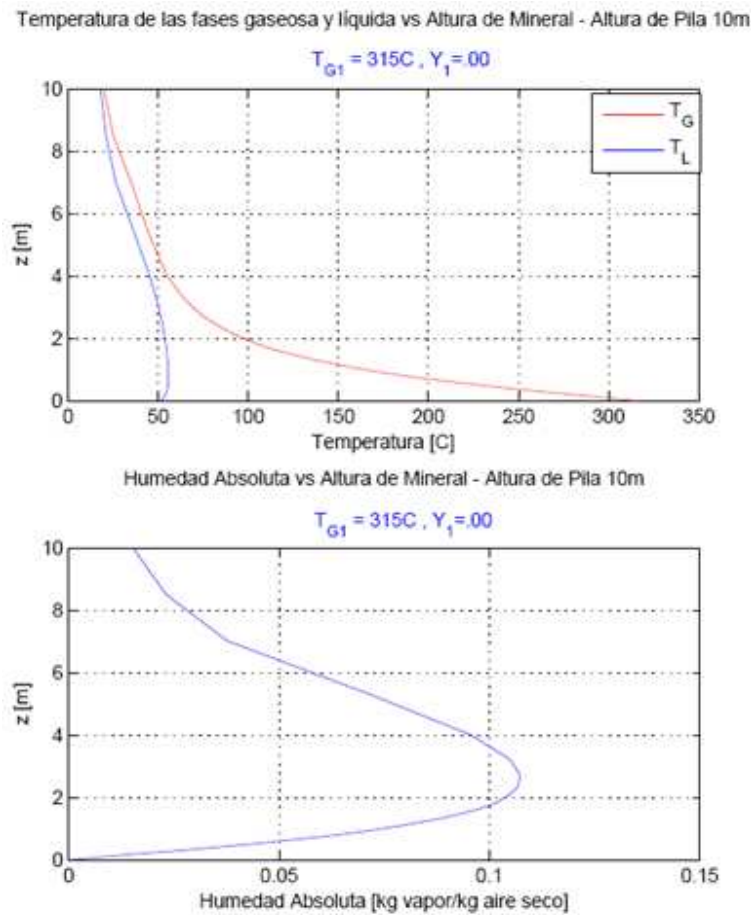
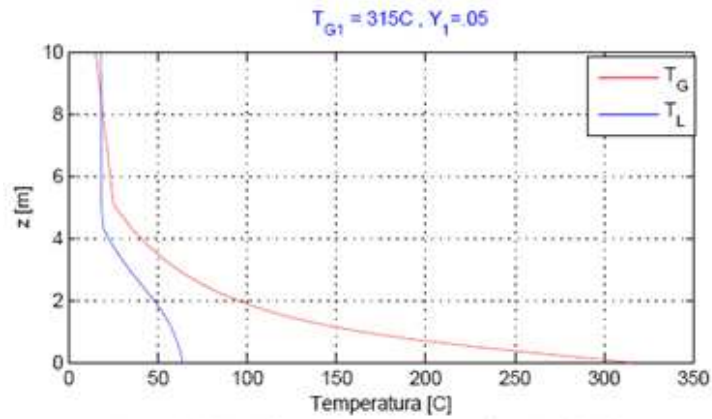


Gráfico 4.7: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 7.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

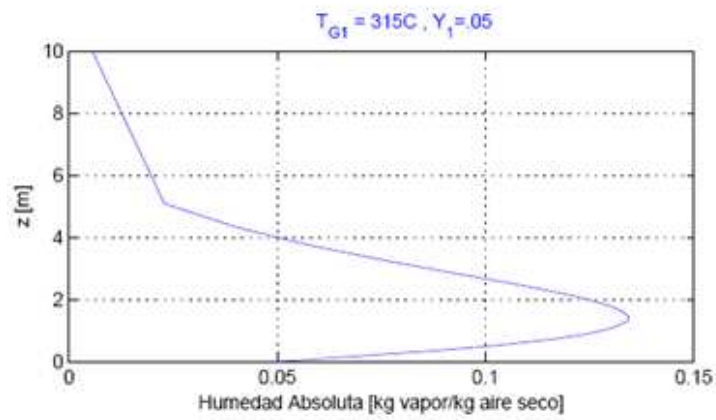
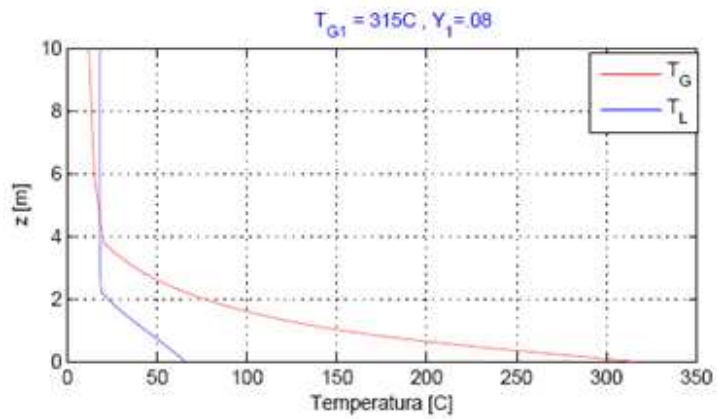


Gráfico 4.8: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 8.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

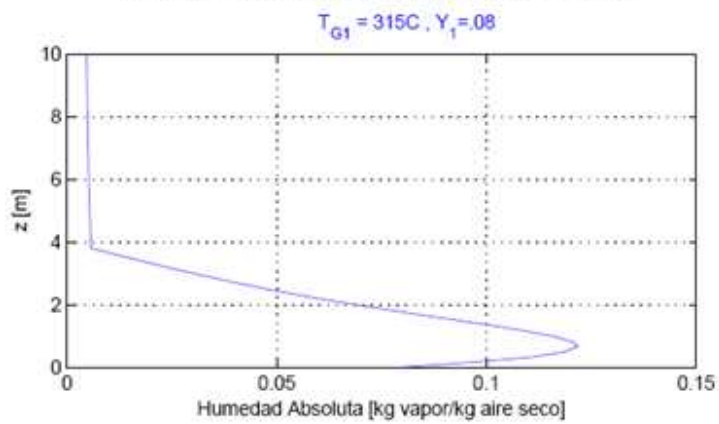
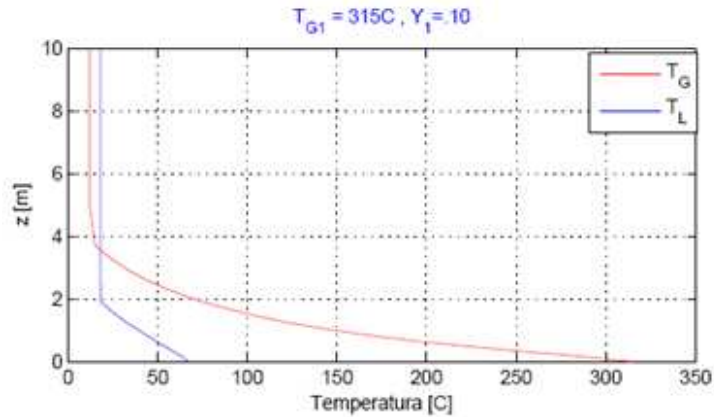


Gráfico 4.9: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 9.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

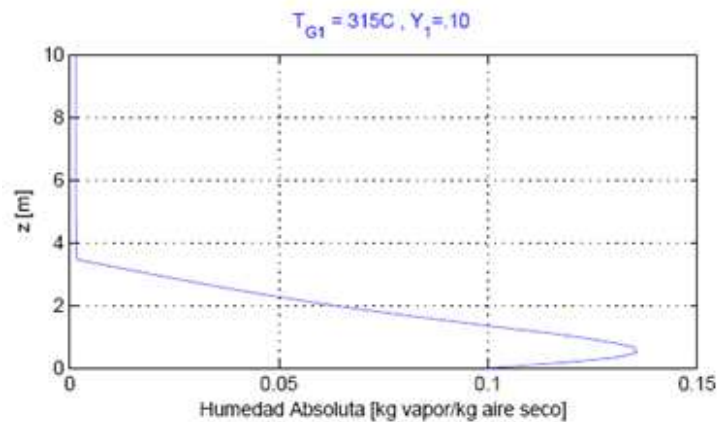


Gráfico 4.10: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 10.

Como es posible observar en los gráficos 4.7 – 4.10 a medida que se aumenta la humedad absoluta de entrada de la mezcla aire-vapor, la temperatura de fondo de la fase líquida aumenta al igual como ocurre en los casos anteriores. También se observa que aunque la temperatura de fondo de la fase líquida aumenta, no ocurre lo mismo con el perfil de la fase líquida. La penetración del calor transportado por la fase gaseosa se hace ineficiente, generando una alta transferencia de calor en los primeros metros de lecho mineral y una transferencia casi nula en la zona superior del lecho, lo que provoca que el perfil de temperatura de la fase líquida se caliente principalmente en el fondo y no a lo largo de todo el lecho mineral que es lo que se busca.

## 4.2 Evaluación Técnica, utilizando tasas de aireación y de irrigación de la minera Escondida

Para lograr una simulación íntegra a los parámetros de operación existentes en la industria, se observa el comportamiento del modelo para los primeros seis escenarios propuestos anteriormente, pero con la diferencia, que las tasas de aireación e irrigación son las correspondientes a datos proporcionados por la minera escondida, tabla 4.2.

Parámetro	Valor	Unidades	Referencia
{tasa aireación}	0.60	$Nm^3 m^{-2}hr^{-1}$	Escondida
{tasa irrigación}	10	$lt m^{-2}hr^{-1}$	Escondida

Tabla 4.2: Tasas de aireación e irrigación de pila de biolixiviación operando en la minera escondida.

Para estos parámetros se analizaron simulaciones con temperaturas de entrada de la mezcla aire-vapor de 20 °C, para ver casos lo más cercanos a la realidad actual de operación de una pila y casos con la temperatura de entrada de la fase gaseosa de 100 °C, para ver el efecto en los perfiles de este posible escenario.

#### 4.2.1 Temperatura de entrada aire-vapor de 20 °C

Siguiendo la dinámica de análisis de la sección 4.1, se buscó lograr la simulación que fuese más a fin con la operación actual de una pila de biolixiviación. Es así como se obtuvieron los resultados de los gráficos 4.11 y 4.12.

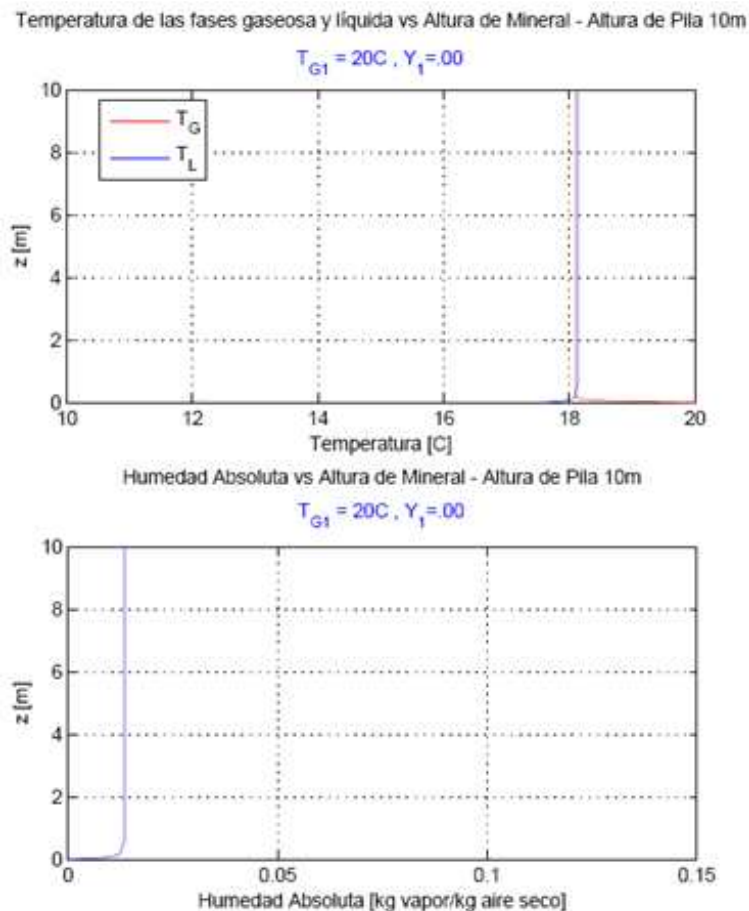
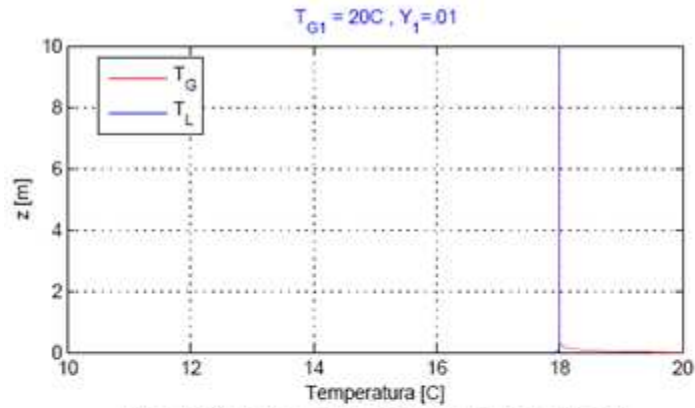


Gráfico 4.11: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 1 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

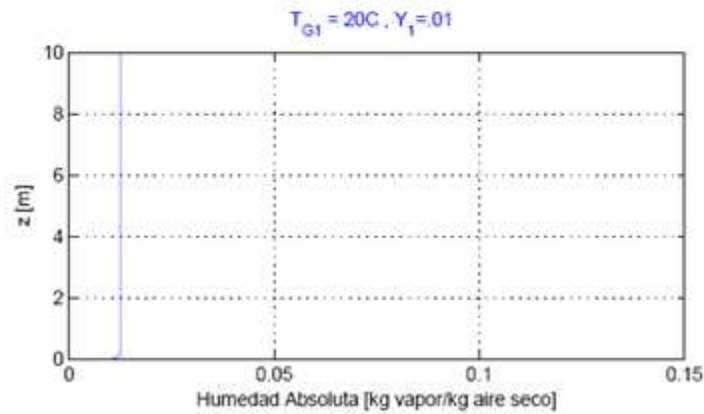


Gráfico 4.12: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 2 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.

El gráfico 4.11 muestra una pérdida de calor sensible para los primeros 50 centímetros de lecho y una transferencia de calor absolutamente nula para los 9.50 metros restantes. También se observa una transferencia de vapor de agua para los primeros 50 centímetros (humidificación del aire) y una nula transferencia de vapor para el resto de los 9.50 metros de lecho. Esto indica que durante los primeros 50 centímetros de lecho mineral existe transferencia de calor y para los 9.50 metros restantes se llega a un equilibrio psicrométrico en el cual no existe transferencia alguna.

Para los resultados del segundo caso mostrado en el gráfico 4.12, se observa un comportamiento muy similar al anterior, lo que muestra un efecto nulo en el hecho de aumentar la humedad absoluta de entrada de la mezcla aire-vapor.

#### 4.2.2 Temperatura de entrada aire-vapor de 100 °C

Al igual como se hizo en la sección 4.1 a continuación se analizan 4 casos para observar el efecto que tendría la entrada de la mezcla gaseosa a 100 °C y a cuatro distintas humedades absolutas. Los gráficos 4.13 – 4.16 resumen los resultados de la simulación realizada.

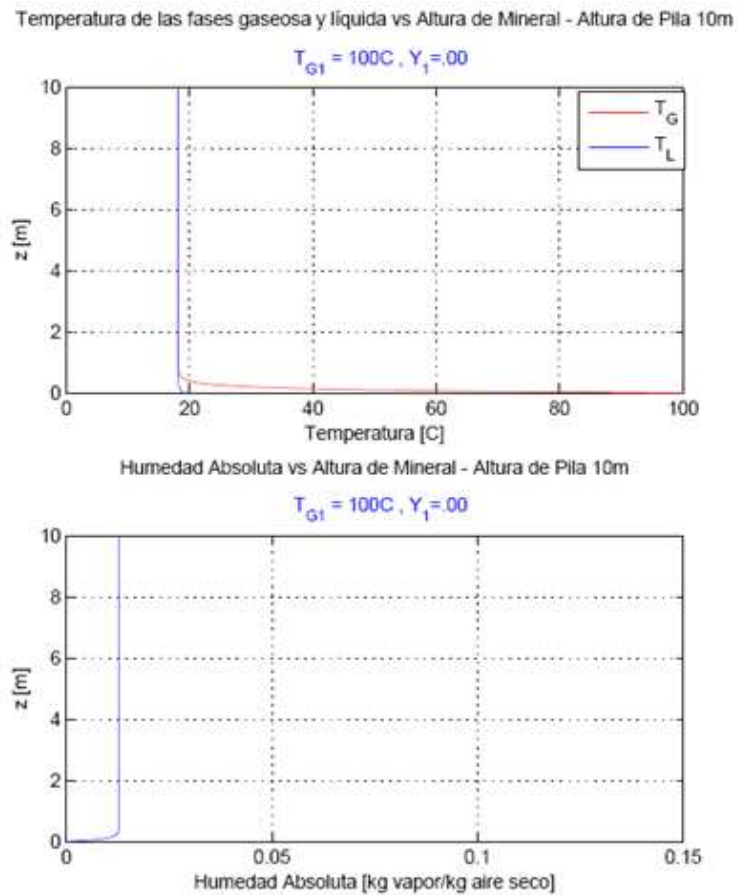
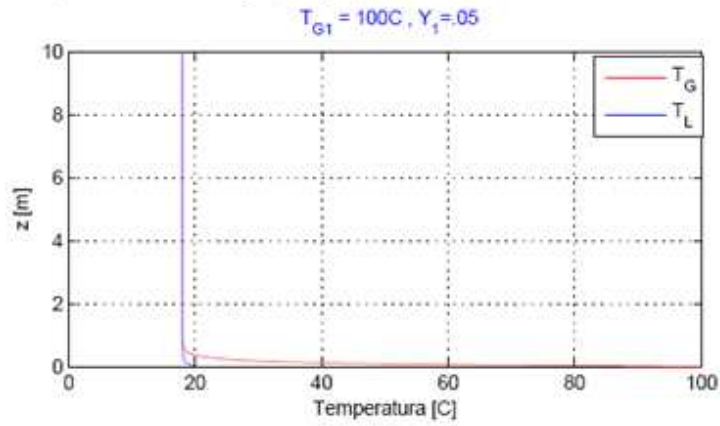


Gráfico 4.13: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 3 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.



Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

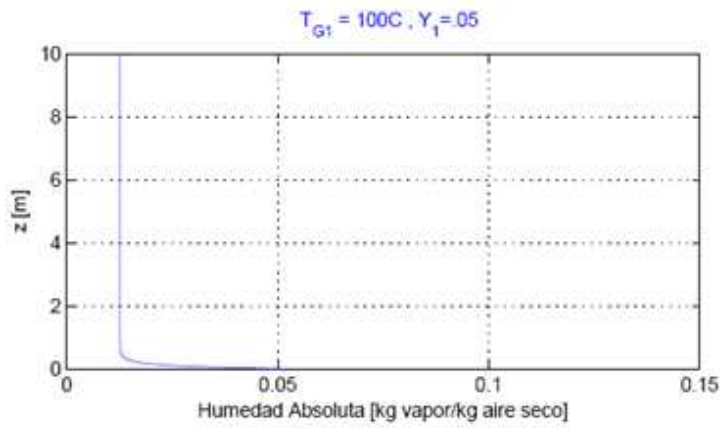
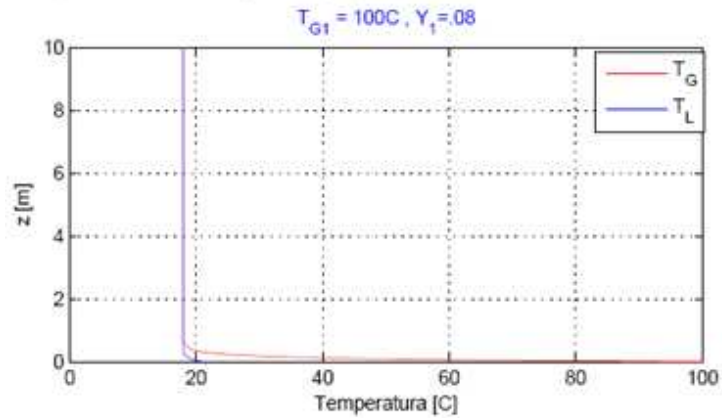


Gráfico 4.14: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 4 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

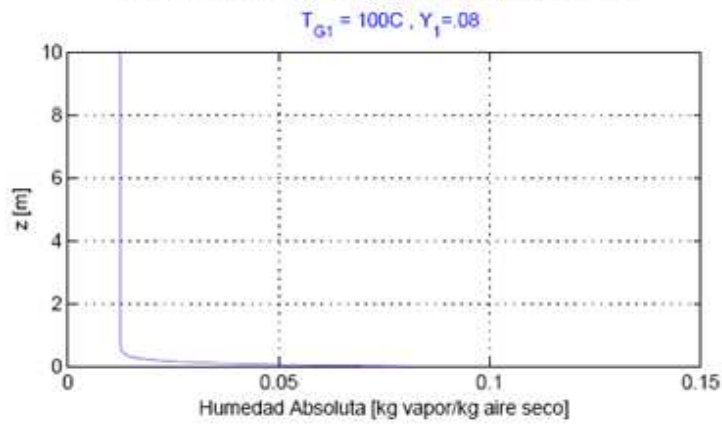
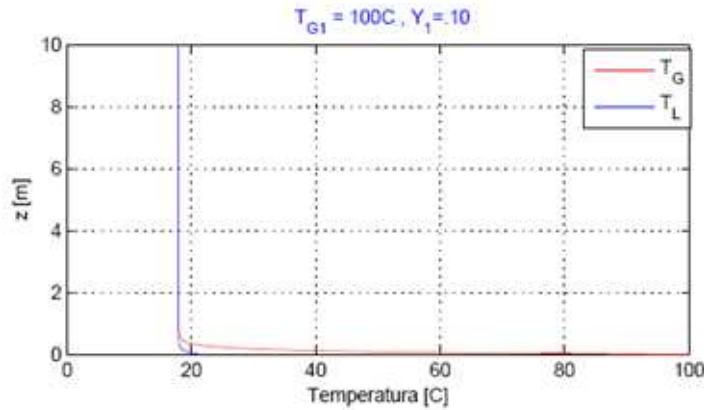


Gráfico 4.15: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 5 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

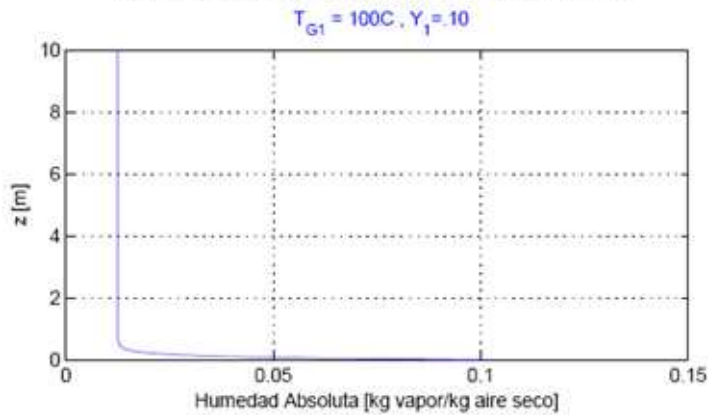


Gráfico 4.16: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Caso 6 – Tasas de aireación e irrigación de minera escondida.

El gráfico 4.13 muestra un pequeño aumento del calor sensible del líquido de irrigación para los primeros 30 centímetros de lecho mineral, pero nuevamente una nula transferencia de calor para los 9.70 metros restantes. También se observa una humidificación del aire para los primeros 30 centímetros y una transferencia de vapor de agua nula para el resto de altura del lecho, lo que indica que el equilibrio psicrométrico se logra en los primeros 30 centímetros de lecho.

Como es posible de observar en los gráficos 4.14 – 4.16, a medida que se aumenta la humedad absoluta de entrada de la mezcla gaseosa el perfil de temperatura de la fase líquida aumenta levemente, llegando a observarse transferencia de calor en el último caso del gráfico 4.16 hasta por lo menos los primeros 50 centímetros de lecho mineral. También en estos gráficos es posible de observarse una deshumidificación de la mezcla gaseosa desde el comienzo del lecho, por ende una transferencia de vapor de agua por lo menos para los primeros 50 centímetros de lecho mineral, en el caso 6 mostrado en el gráfico 4.16.

### 4.3 Evaluación Técnica, escenarios con mejoras

Dado que el efecto sobre la temperatura del líquido era muy pequeño, se evaluará diferentes alternativas para mejorar el efecto. Para todas estas mejoras se fijó un aumento de la tasa de aireación de escondida de un 1000%, es decir, se aumentó 10 veces la tasa de aireación de la pila típica en un proceso minero. Se presume que este aumento del 1000%, es un máximo aceptable en escala industrial. Luego de los diversos casos analizados se concluyó que la mejor temperatura de entrada de la mezcla aire-vapor a proponer para posibles mejoras, debía ser 100 °C. Por lo que los escenarios de mejoras propuestos a analizar fueron simplemente dos. En el primer escenario se observa que alternativa de humidificación de la mezcla aire-vapor es más apropiada de elegir para la entrada. El segundo escenario simula la acción que se podría obtener en el tiempo, por el líquido que es recirculado y calentado una y otra vez durante el proceso de biolixiviación.

#### 4.3.1 [Escenario 1]

Se analizaron diversos casos de humedad absoluta, para la mezcla gaseosa de entrada. Los casos de este escenario se aprecian en los gráficos 4.17 – 4.21.

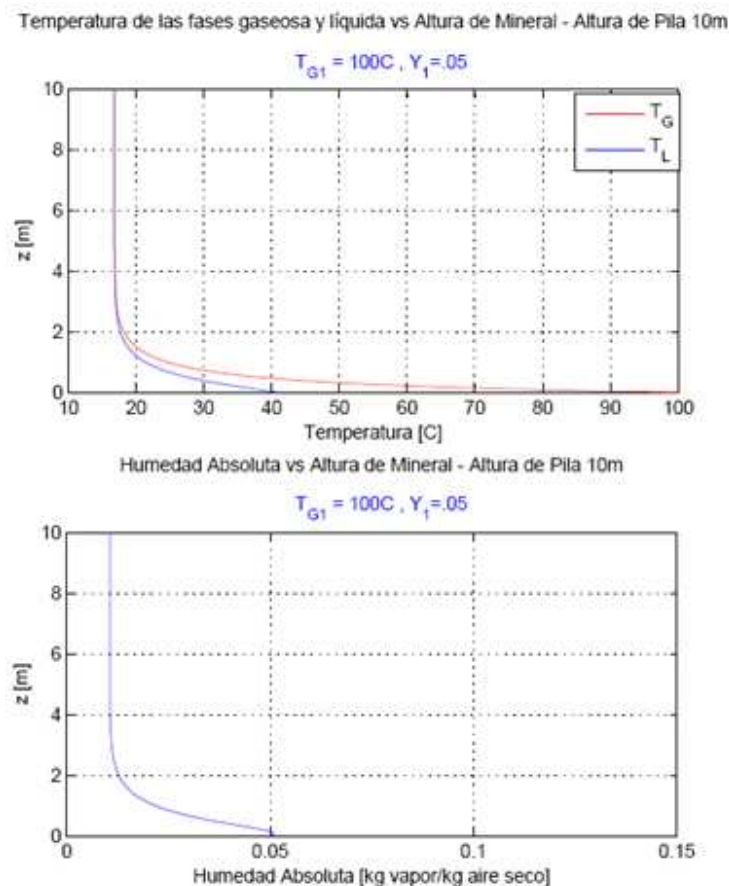
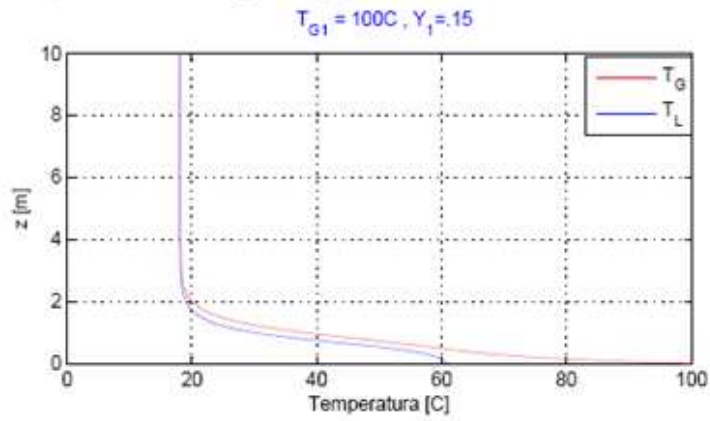


Gráfico 4.17: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 1 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

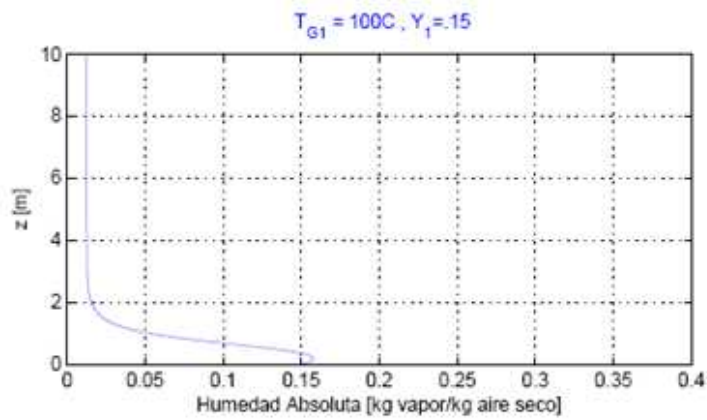
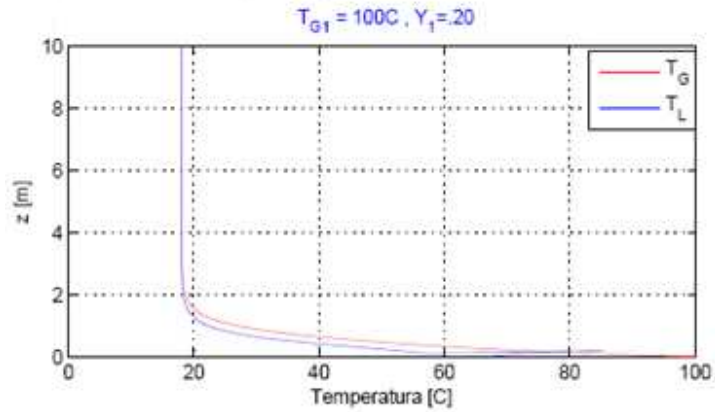


Gráfico 4.18: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 2 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

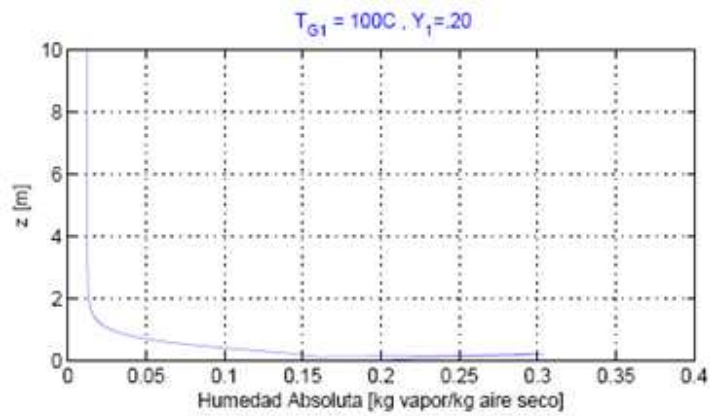
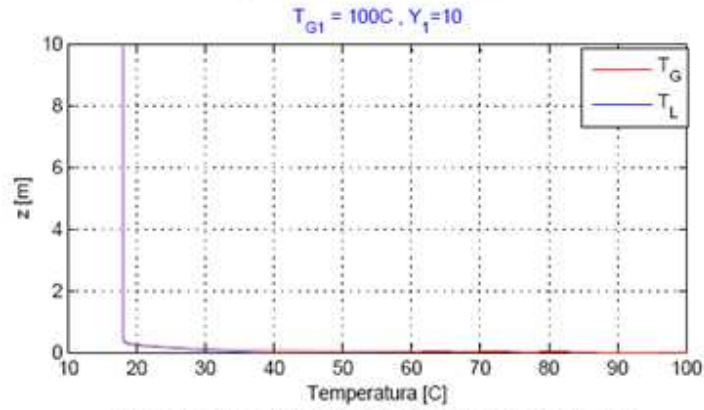


Gráfico 4.19: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 3 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

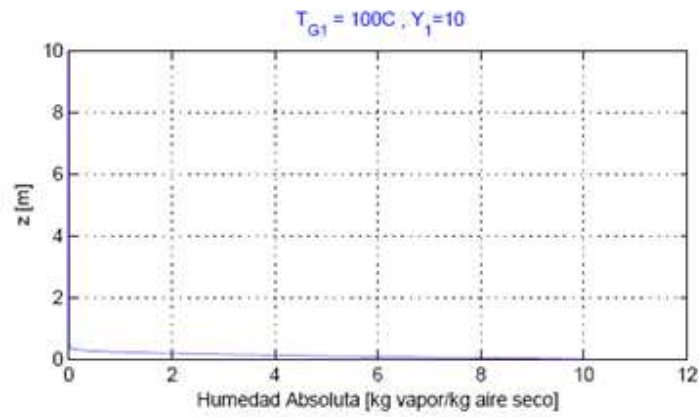
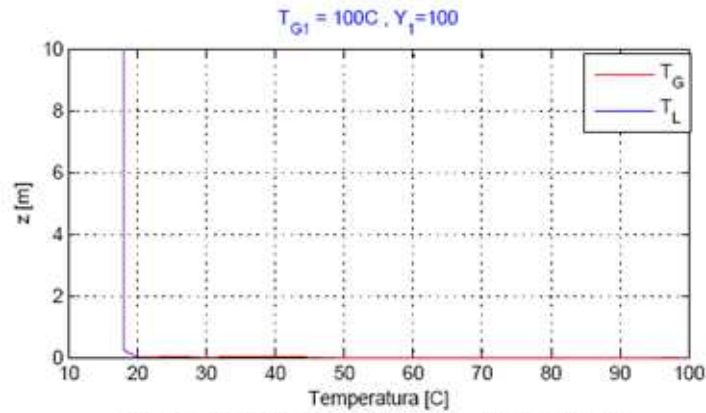


Gráfico 4.20: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 4 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

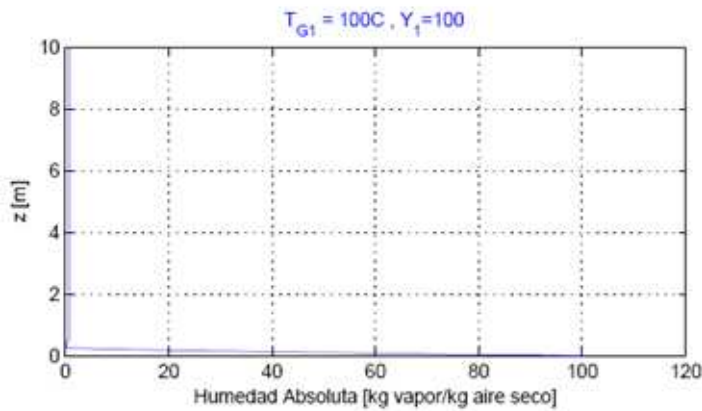


Gráfico 4.21: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 1, Caso 5 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.

En los casos 1 – 3 se intentó observar el efecto que tendría el aumentar gradualmente la humedad de entrada, los gráficos 4.17 – 4.19 muestran un proceso de deshumidificación de la mezcla gaseosa, para aproximadamente los primeros 2 metros y que existe una transferencia nula para los aproximadamente 8 metros de lecho mineral restante.

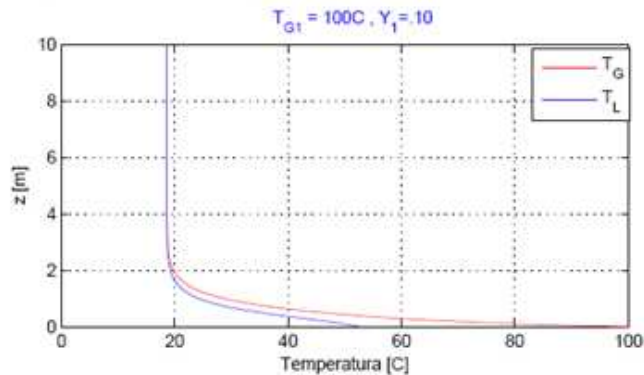
Los casos 4 y 5 simulan el caso en que la mezcla aire-vapor posee elevado contenido de vapor, es decir, simula casos en los que se introduce al lecho mineral vapor puro, en ambos casos, se observa una pérdida del calor sensible de la fase gaseosa muy rápida además de una condensación del vapor también muy rápida, logrando una transferencia de la totalidad del calor en los primeros 50 centímetros y posteriormente llegando a un equilibrio psicrométrico en el cual no se aprecia transferencia.



### 4.3.2 [Escenario 2]

En este escenario se intenta simular la acción que se podría obtener en el tiempo, con el efecto del recirculamiento del líquido calentado en el proceso de biolixiviación. Los gráficos 4.22 y 4.23 muestran las temperaturas y humedad absoluta, correspondientes a la etapa inicial y final de este escenario.

[Etapa 1] Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



[Etapa 1] Humedad Absoluta vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m

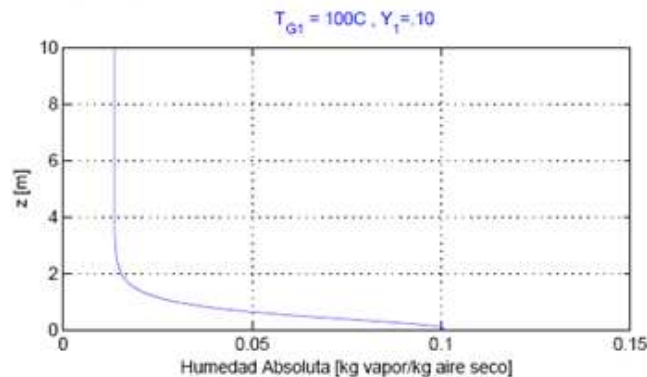


Gráfico 4.22: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 2 / Etapa 1 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.

Como se puede observar el líquido entra a la temperatura estándar de 18 °C y sale calentado con una temperatura de unos 53 °C en la primera etapa. Este segundo escenario pretende ver el caso de cuando el líquido es recirculado, este debe entrar superiormente a una temperatura mayor que estos 18 °C en una supuesta segunda etapa. Se debe considerar que durante la recirculación del líquido de irrigación en el proceso de la hidrometalurgia, se disipa mucho calor. Es por esto, que para la segunda etapa, se propone una pérdida del 80% de la temperatura ganada en la primera etapa del escenario. Es decir, si el líquido sale a 53 °C, significa que este ganó un delta de temperatura de 35 °C, la pérdida de un 80% sobre estos 35 °C, significa una ganancia neta

de solo 7 °C, por lo que la fase líquida en la segunda etapa de este escenario debe entrar a 25 °C. El resultado de esto último es lo que se ve en el gráfico 4.23.

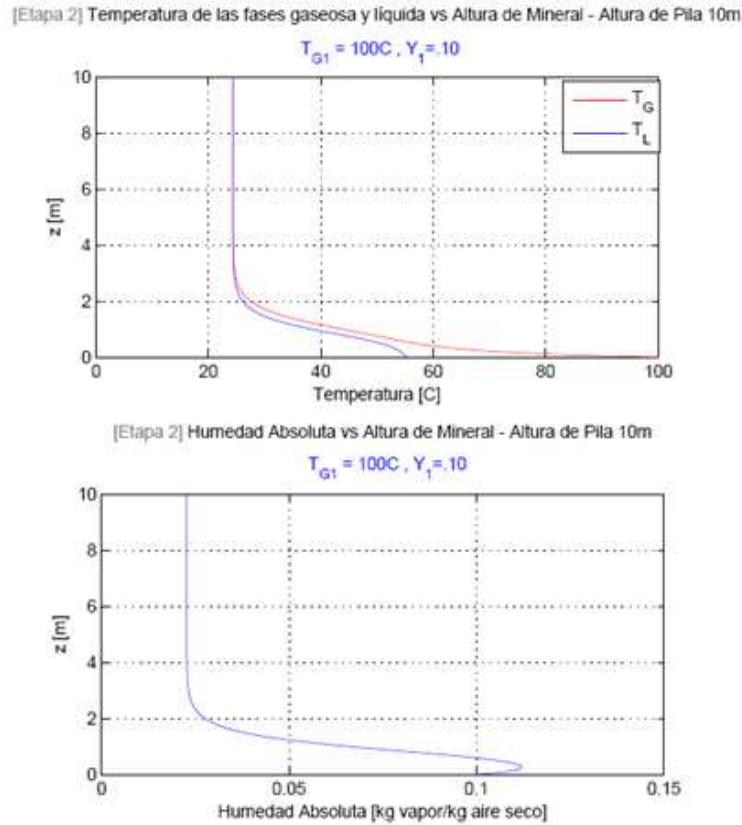


Gráfico 4.23: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor, de la solución de riego descendiente y de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor a lo largo de 10 metros de empaque mineral; Escenario 2 / Etapa 2 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.

El efecto que se obtiene sobre el calentamiento del perfil completo de la temperatura del líquido considerando estas dos etapas, se ve representado en el gráfico 4.24.

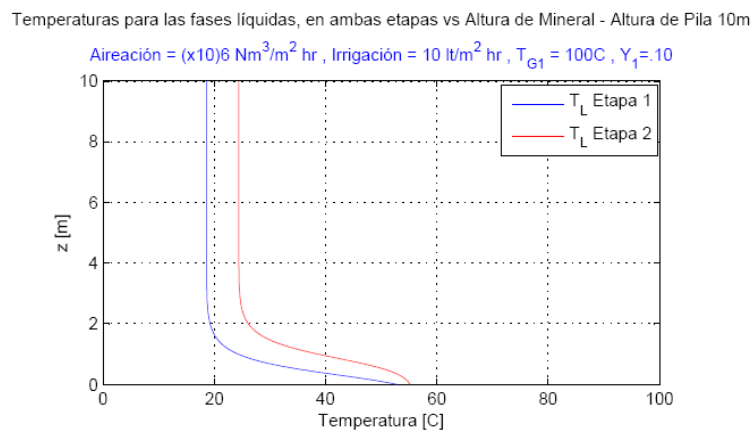


Gráfico 4.24: Calentamiento del perfil de temperatura de la fase líquida a, representado en 2 etapas de tiempo; Escenario 2 – Tasas de aireación (x10) e irrigación de minera escondida.

## 4.4 Evaluaciones económicas

En este subcapítulo se estudia la significancia económica de los escenarios propuestos como posibles mejoras con respecto a los parámetros utilizados por una pila de biolixiviación típica. Un completo detalle de lo que correspondería realizar en una evaluación económica completa, corresponde a lo presentado en la figura 4.1.

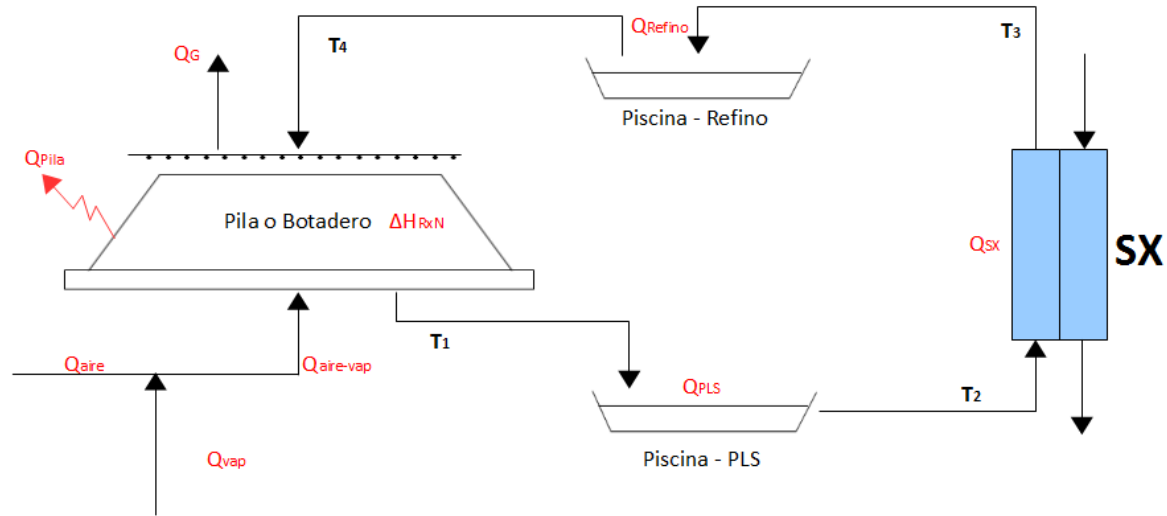


Figura 4.1: Diagrama conceptual de Evaluación económica.

Para determinar correctamente la demanda de calor necesario para el proceso, debiese realizarse un balance de energía que considere que la demanda de calor requerida por los paneles solares, debe ser igual al calor disipado por la pila ( $Q_{Pila}$ ), más el calor de reacción consumido o liberado ( $\Delta H_{RxN}$ ), además de los calores correspondientes al disipado por la piscina del PLS ( $Q_{PLS}$ ), de la extracción por solventes ( $Q_{SX}$ ) y de la piscina de refino ( $Q_{Refino}$ ), lo que corresponde a la (Ec. 4.1).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Demanda} \\ \text{de Calor} \end{array} \right\} = Q_{aire-vap} - Q_G = Q_{Pila} + \Delta H_{RxN} + Q_{PLS} + Q_{SX} + Q_{Refino}$$

(Ec. 4.1)

Actualmente no se tiene un conocimiento sólido del calor disipado por la pila, ni por el calor disipado por las piscinas de PLS y refino, ni tampoco por del disipado por la operación unitaria de extracción por solventes. Además en este estudio tampoco se estudió la liberación y el consumo energético de las reacciones biológico-químicas en la pila, por lo que en las evaluaciones económicas de esta memoria de título, se determinó la demanda de calor necesaria como se muestra en la (Ec. 4.2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Demanda} \\ \text{de Calor} \end{array} \right\} = Q_{aire} + Q_{vap} - Q_G = \left\{ \begin{array}{l} \text{Demanda} \\ \text{Solar} \end{array} \right\}$$

(Ec. 4.2)

De esta manera se logra tener una primera estimación rápida de las posibilidades económicas que éstas alternativas presentan. Se decidió evaluar económicamente el escenario 2 representado en los gráficos 4.22 y 4.23. Los parámetros utilizados para ésta evaluación, corresponden a los de la tabla 4.3.

Parámetro	Valor	Unidades	Referencia
$T_{G1}$	20	°C	Asumida
$(T_{G1})_{modificada}$	100	°C	Definido por escenarios
$Y_1$	.00	$kg \text{ vapor } (kg \text{ aire})^{-1}$	Asumida
$(Y_1)_{modificada}$	.10	$kg \text{ vapor } (kg \text{ aire})^{-1}$	Definido por escenarios
{tasa aireación}	0.60	$Nm^3 m^{-2} hr^{-1}$	Escondida
{tasa aireación} <sub>modificada</sub>	6	$Nm^3 m^{-2} hr^{-1}$	Asumida
Superficie de pila	2	ha	Asumida
$\rho_r$	2700	$kg m^{-3}$	Bartlett, [5].
Ley del mineral	1	%	Asumida
Precio Cobre	3.00	$USD\$ (Lb Cu)^{-1}$	Bolsa de metales de Londres
Radiación promedio	600   517	$W m^{-2}   kcal hr^{-1} m^{-2}$	Asumido
Costo unitario de Planta Solar	1,000,000	$Euro MW^{-1}$	Gobierno Español
Cambio Moneda	1.49	$USD (Euro)^{-1}$	Emol Económicos, [34].
Eficiencia Solar	80	%	Asumido
Tasa de descuento	10	%	Asumida

Tabla 4.3: Parámetros utilizados en la evaluación económica.

Los ingresos que proporcionan cada mejora, se encuentran determinados por medio del perfil de temperatura de la fase líquida, se obtiene una temperatura promedio de operación para toda la pila. Esto último es simplemente un promedio ponderado de la temperatura de la fase líquida, a lo largo de la pila, como se muestra en la (Ec. 4.3).

$$T_{av} = \frac{\sum_{k=1}^n (T_k \cdot \Delta z_k)}{h}$$

(Ec. 4.3)

Una vez obtenida  $T_{av}$  es posible realizar los cálculos respectivos para los ingresos de este escenario por medio de los datos del gráfico 1.2, es posible obtener el porcentaje de aumento en la recuperación del cobre respectivo al escenario propuesto, en comparación con el escenario de una aireación de aire seco a temperatura de entrada de 20 °C. En este escenario la temperatura promedio de operación, a la cual se logra mantener operando la pila es de  $T_{av} = 28.11$  °C. En éste escenario se consideró el aumento en la temperatura de entrada de la solución ácida que se obtiene por la recirculación de éste, el cual comienza a entrar a 25 °C, esto último se explica detalladamente en la sección 4.3.2.

Los egresos por otro lado, se obtienen por el costo de inversión de los equipos termosolares, de los cuales su potencia es determinada por el flujo de aire a calentar, además de su humidificación respectiva, esto se logra haciendo un balance de entalpía entre el flujo de aireación sin calentar, ni humidificar y el flujo de aireación calentado y humidificado. En la (Ec. 4.4) se muestra la entalpía considerando el calor del aire y del vapor acompañante, este cálculo es utilizado para determinar la demanda solar requerida.

$$\begin{aligned} \Delta H_G &= H_{modificada} - H_{inicial} \\ &= \{G'_S C_{PS,modificada} (T_{G1,modificada} - T_0) + G'_S Y'_{1,modificada} \lambda_0\} \\ &\quad - \{G'_S C_{PS,inicial} (T_{G1,inicial} - T_0) + G'_S Y'_{1,inicial} \lambda_0\} = \left\{ \begin{matrix} Demanda \\ Solar \end{matrix} \right\} \end{aligned}$$

(Ec. 4.4)

Además es necesario considerar la eficiencia de los equipos termosolares, por lo que la potencia de planta requerida por los equipos termosolares, corresponde a la de la (Ec. 4.3).

$$\left\{ \begin{matrix} Potencia \\ de Planta \end{matrix} \right\} = \frac{\left\{ \begin{matrix} Demanda \\ Solar \end{matrix} \right\}}{\left\{ \begin{matrix} Eficiencia \\ Solar \end{matrix} \right\}} \cdot \left\{ \begin{matrix} Superficie \\ de Pila \end{matrix} \right\}$$

(Ec. 4.5)

Gracias al valor de la potencia de planta es sencillo calcular la inversión necesaria para los equipos termosolares, por medio del valor de *1 euro/Watt instalado*, obtenido del Gobierno español. La tabla 4.3 presenta los parámetros utilizados en esta evaluación.

Los resultados económicos obtenidos para este escenario se encuentra en la tabla 4.4.

Escenario 2 – Pila de 2 hectáreas de superficie		
VAN	9,695,251	USD
TIR	34	%
IVAN	58	%
Potencia de Planta Instalada	11.13	MW
Terreno Solar necesario	1.85	ha

Tabla 4.4: Principales resultados económicos para implementación del escenario 2 – 2 hectáreas de pila.

## 5 Discusiones

Este trabajo presenta un importante avance en el modelamiento y estudio de los fenómenos de transferencia a lo largo de una pila de biolixiviación. Ya que en la literatura actual, son muy reducidos los estudios, que consideren los fenómenos de humidificación presentes entre las fases líquida y gaseosa, de un lecho mineral poroso. Además de plantear opciones, para el posible aumento de los rendimientos correspondientes a este proceso.

Hoy en día, no se posee un completo entendimiento de los mecanismos, ni del comportamiento de los microorganismos, presentes en el entorno del material mineral. Pero si se han podido determinar ciertos patrones de comportamientos en estos. Se ha comprobado experimental, como también teóricamente, que el aumento de la temperatura del medio en el cual habitan los microorganismos, influye tanto en su cinética de reproducción, como en el tipo de familia de microorganismos presentes en el medio. Trayendo esto último, significativas consecuencias en las tasas de recuperación del cobre extraído en el fenómeno de la biolixiviación.

El uso de energía solar por sobre el de energías convencionales, se justifica principalmente por 3 razones. La primera corresponde a las ventajas ecológicas que esta energía tiene asociada, variable que por las actuales normas internacionales se encuentra fuertemente exigida, especialmente en la industria de los metales. La segunda tiene un carácter estratégico, la industria minera del cobre en Chile (y en gran parte del mundo), se encuentra localizada en regiones características de climas calurosos, y de una radiación mayor a la radiación promedio del planeta. Esto hace atractivo el uso de esta tecnología, de la cual, su principal fuente de energía es la radiación solar, además de la carente accesibilidad a energías convencionales que se presenta en estas zonas inhóspitas y áridas. Finalmente la tercera razón es económica, si bien en su contexto general, hoy en día la energía solar sigue siendo una energía costosa, el desarrollo del área de la energía termosolar, ha alcanzado precios de nivel competitivo para el mercado energético actual. Inversiones del orden de un millón de euros por mega watt instalado, son los que hacen a esta una tecnología competitiva y atractiva.

El modelo matemático de esta tesis, corresponde a un método utilizado en la ingeniería química desde hace más de un par de décadas atrás. El algoritmo de este método es atípico a lo que comúnmente se encuentra en la literatura, pero desde el punto de vista de la teoría en humidificación, éste es el método que mejor explica y representa los fenómenos de transferencia, que ocurren en estado estacionario entre una fase gaseosa y una líquida a lo largo de un lecho relleno.

Técnicamente el método utilizado por el modelo se define como uno que obtiene alturas de lechos rellenos, por medio de una discretización de la temperatura de la mezcla gaseosa, a medida que esta se va enfriando a lo largo del lecho mineral. Esta altura de lecho relleno, es posible de controlar por medio de las temperaturas y humedades de salida, que son determinadas para la mezcla gaseosa. Utilizando apropiadamente lo anterior, es como se puede establecer una altura de lecho fija para cada uno de los escenarios estudiados en esta memoria.

Las ecuaciones de transferencia involucradas en el modelo corresponden a balances de masa y entalpía para la fase líquida y la gaseosa, además de considerar los balances globales correspondientes a cada diferencial de altura. De acuerdo a la teoría de humidificación de gases, las ecuaciones de transferencia de masa que fueron utilizadas, son estrictamente gobernadas por el gradiente de humedad absoluta en cada diferencial de altura, mientras que las ecuaciones de transferencia de calor, corresponden a balances de entalpía en los cuales el calor húmedo y el calor de cambio de fase de la mezcla gaseosa son considerados.

## 5.1 Evaluación Técnica

Para ciertas condiciones de operación simuladas en este trabajo, como la de los primeros casos a temperaturas de entrada de la mezcla aire-vapor a 100 y 315 °C, se presenta un comportamiento suave y estable para las curvas de temperatura líquida y gaseosa, además de la curva de humedad absoluta correspondiente. Por otro lado, se observa que para los dos casos en los que se utiliza una temperatura de entrada de la mezcla gaseosa a 20 °C una importante parte del calor transferido a lo largo del lecho mineral es utilizado en humidificar el aire entrante. Para estos casos, este calor transferido corresponde a una pérdida de calor sensible de la fase gaseosa y de la fase líquida descendiente por el lecho mineral. Esto último provoca un enfriamiento en ambas fases, lo que conlleva una disminución en la cinética química y microbiológica presente en el material mineral. Finalmente a escala industrial esto se traduce en una disminución en las tasas de recuperación del cobre en el proceso biohidrometalúrgico. Para los cuatro casos de mezcla aire-vapor a entrada de 100 °C, se observa un comportamiento del líquido descendente bastante colindante (proporcional) con la temperatura de la mezcla gaseosa ascendente. Un calentamiento homogéneo y suave, es el que se ve presente para el líquido descendente en estos casos, acompañado de un enfriamiento de la mezcla gaseosa a medida que esta asciende con las mismas características. También para estos 4 casos se observa siempre un pequeño aumento de la humedad absoluta para aproximadamente los primeros 3 metros de lecho mineral, seguido de una disminución de la humedad absoluta para los 7 metros restantes. Esto último es bastante óptimo desde el punto de vista del proceso industrial, ya que equivale a un fenómeno de deshumidificación de la mezcla gaseosa, presente por lo menos en un 70% del lecho mineral, lo que corresponde a un gran uso del calor latente transportado por el vapor, el cual es liberado en la condensación de este vapor en el proceso de deshumidificación de la mezcla aire-vapor, calentando directamente el líquido de irrigación descendente y por ende, aumentando la temperatura de operación en la pila. El comportamiento que se observa en estos 4 casos, sería el ideal a obtener en el proceso minero. Los resultados para los 4 últimos casos a una temperatura de la mezcla gaseosa de 315 °C, mostraron un comportamiento de un sobre calentamiento en la zona inferior de la pila, para tan solo los primeros 4 a 5 metros de altura, lo que resulta poco atractivo desde el punto de vista industrial. Ya que al subir la temperatura sin aumentar correspondientemente la humedad absoluta, no se logra un aumento proporcional en la temperatura del líquido ya que se genera mucha evaporación. Esta última es la razón por la cual posteriormente, no se realizaron más estudios, ni análisis para los casos de temperaturas de entrada de mezclas gaseosas mayores a 100 °C.

## 5.2 Evaluación Técnica, utilizando tasas de aireación y de irrigación de la minera Escondida

Posteriormente se estudiaron 6 casos más con las tasas de aireación e irrigación correspondientes a una pila de biolixiviación de la minera escondida. Estos 6 casos arrojan el resultado directo, de que toda la transferencia de calor y masa tienen lugar en los primeros 50 centímetros de mineral. Lo que indica que más de un 90% del lecho mineral, no se ve afectado por las modificaciones en la temperatura y humedad absoluta del aire inyectado por el sistema de aireación.

## 5.3 Evaluación Técnica, escenarios con mejoras

Luego del análisis pertinente de los 10 primeros casos y los 6 últimos, se llegó a la conclusión que teóricamente, debe ser necesario analizar escenarios en donde, el flujo de aireación de la mezcla aire-vapor debería ser aumentado 10 veces relativamente a los datos de flujo de las tasas de aireación en la minera escondida. Además para estos escenarios se fijó una temperatura para la fase gaseosa de 100 °C, debido a los buenos resultados presentados en los primeros casos. Otra razón que justificó esta elección, corresponde a la libertad termodinámica que se obtienen con 100 °C, ya que corresponde a la temperatura de ebullición del vapor de agua, lo que por teoría en el área de humidificación de gases, hace posible cargar el aire con vapor de agua de manera ilimitada.

El primero de los escenarios propuestos como posibles mejoras, presenta 5 posibles casos con distintas humedades absolutas para la fase gaseosa de entrada. Posee una tasa de aireación diez veces mayor a la tasa de aireación de la utilizada para los casos de la minera escondida, una temperatura de 100 °C. En los 3 primeros casos, correspondientes a los gráficos 4.17 – 4.19 se observa un aumento de la temperatura de la fase líquida para los primeros 2 metros de mineral, siendo la temperatura máxima de fondo en la fase líquida de aproximadamente 40 °C. Esto último determina mejores resultados que los obtenidos para los casos con las tasas de aireación de la minera Escondida. Los 2 últimos casos de este escenario correspondientes a los gráficos 4.20 y 4.21, simulan casos en donde gran fracción de la mezcla aire-vapor corresponde a vapor y muestran un muy bajo calentamiento de la fase líquida, por lo que no resultan atractivos. La razón de esto, no es fácil de dilucidar a simple vista, pero analizando todo el set de resultados del modelo, en cada escenario, se descubrió que a medida que se aumenta la humedad absoluta de entrada de la mezcla gaseosa, al mismo tiempo se está disminuyendo el flujo de aire seco que se está inyectando por metro cuadrado, lo que deja con una importante ponderación en la mezcla al vapor de agua. Técnicamente, esto último equivale a incrementar el volumen húmedo de la mezcla gaseosa, lo que disminuye considerablemente la densidad de esta. En resumen, el problema que estos últimos dos escenarios presentan, es que el vapor utiliza demasiado volumen, por lo que la masa neta de la mezcla aire-vapor disminuye al aumentar la humedad absoluta de esta, dejando en magnitudes muy pequeñas el calor que esta es capaz de transportar y transferir.



El segundo de los escenarios propuestos corresponde a una interpretación de lo que es posible que ocurra con el perfil del líquido descendiente a lo largo del tiempo. Al igual que el primer escenario se utiliza una tasa de aireación de diez veces la actualmente utilizada en la pila de Escondida, una temperatura de 100 °C y difiriendo con una humedad de 0.10 kilogramos de vapor de agua, por kilogramo de aire. Se supusieron 2 etapas de tiempo, entre las cuales, existe en la segunda etapa una pérdida de un 80% del calor ganado en la primera, esto último fue asumido y cabe remarcar que no se tiene conocimiento empírico de este supuesto. Lo que hace perder credibilidad a los resultados de este escenario. Es por esto, que este escenario es simplemente una representación ilustrativa, de lo que posiblemente puede pasar con la operación de este sistema a lo largo del tiempo, se debe tener presente que más datos experimentales, además de una extensión del modelo para poder analizar transcientes de tiempo, serán necesarios a futuro.

## 5.4 Evaluaciones económicas

En el capítulo de evaluaciones económicas de esta memoria de título, se utilizó para medir los ingresos que eventualmente generarían la recuperación extra de cobre en el proceso de biolixiviación. Esta recuperación extra de cobre, está definida por el aumento de la cinética química presente en el material lixiviado. Para los egresos asociados a esta evaluación económica, solamente se contabilizó el costo de inversión asociado con respecto a la potencia planta termosolar a instalar. Cabe recalcar que costos por el incremento de 10 veces las tasas de aireación, no fueron incorporados, por la nula existencia del conocimiento que se posee de ellos. Para el escenario evaluado se consideró la alternativa de implementar el sistema para 2 hectáreas de superficie de pila, obteniéndose un valor actual neto positivo lo que da crédito a la inversión en este escenario. Además la tasa de rentabilidad interna da de un 34%, es decir, es mayor que el 10% de la tasa de retorno elegida en la evaluación económica, por lo que este indicador refuerza el potencial económico existente en este escenario en conjunto con el valor de un IVAN de 58%, lo refuerza la necesidad de estudios a futuro, en los cuales se considere la recirculación del ácido en una pila durante un transciente de tiempo.

## 5.5 General

Cabe discutir sobre posibles mejoras a poder incorporar a futuro. El uso niebla es una de estas, las partículas de niebla se forman por el exceso de saturación en una mezcla gaseosa, formando partículas de tamaños entre 0.10 y 30 micrómetros. Este exceso de saturación es llamado estado de súper-saturación de un gas o popularmente llamado niebla. Termodinámicamente se entiende como un estado en el cual la mezcla gaseosa se encuentra a una temperatura menor a la de su punto de rocío, en conjunto con una humedad mayor a la de su saturación. Se hace interesante estudiar a futuro posibles casos con niebla, por su facilidad de generación y su gran cantidad de partículas de agua que esta es capaz de transportar, es decir, a la gran cantidad de masa que esta es capaz de transportar en un volumen restringido (esta cantidad de masa es relevante, en comparación a la transportada en el vapor de agua puro). Aunque también se presupone desde ya, que la niebla solamente es capaz de transportar calor sensible y

no el importante calor latente que transporta el vapor de agua, esto es un punto en contra de la niebla en comparación al vapor de agua. Además teóricamente se sabe que para la niebla, el inverso de la temperatura del gas y los puntos de saturación supercrítica están exponencialmente relacionados, lo que equivale a decir que, para poder generar una mezcla de gas con mucha niebla, es necesario trabajar con temperaturas bajas, lo que resulta en disminuir el calor sensible que esta niebla transporta, esto último equivale a otro punto en contra.

A nivel mineralógico, es urgente el estudio empírico de la porosidad y microestructura del material mineral sulfurado y oxidado presente en una pila de biolixiviación. Se ha determinado por medio de la manipulación del modelo, que el parámetro de mayor sensibilidad en los resultados, corresponde al coeficiente de empaque asociado al mineral, por lo que una obtención de este valor de manera empírica, se hace necesaria para una mayor solidez del modelo.

Finalmente un modelo que sea capaz de analizar estados transcientes de fenómenos de humidificación, debe ser implementado para poder lograr mayor información con respecto a cada escenario. El tiempo necesario para poder llegar a estados estacionarios para cada escenario, es un dato necesario de saber, antes de realizar cualquier inversión al respecto. Lamentablemente este modelo no es capaz de producir este dato. Además para una mayor precisión del modelo, se recomienda la implementación de ecuaciones de transferencia de calor entre las fases líquida y sólida, ya que como se explicó en el capítulo 3 de metodología, esta tampoco es considerada en este modelo.

## 6 Conclusiones

Se concluye que para las mezclas aire-vapor en las cuales su humedad absoluta de entrada es baja, una gran parte del calor sensible del aire será utilizado en humidificar la mezcla gaseosa, transformándolo a calor latente del vapor generado en la mezcla, esto ocurrirá indiferentemente de la temperatura que esta mezcla gaseosa posea.

Se observó para todos los casos estudiados, que a temperatura constante, un aumento en la humedad absoluta de la mezcla gaseosa, conlleva un aumento directo en la temperatura de salida alcanzada por el líquido de riego a la salida del lecho mineral. Esto último, solo para los casos de temperatura de entrada a 100 °C implicó un aumento del perfil completo de temperatura del líquido descendiente y por ende un aumento en la temperatura de operación de la pila de biolixiviación.

Luego de los resultados de los primeros 10 casos y posteriormente de los 6 casos siguientes con los flujos de operación de una pila de la minera escondida, el modelo arrojó que para los último 6 casos, la transferencia a lo largo de lecho solamente era existente para los primeros 50 centímetros de lecho mineral. Luego de analizar los resultados, se comparó el *ratio* másico del flujo del líquido de irrigación con respecto al flujo de aireación, para los 2 grupos de casos. El resultado fue el siguiente:

$$\left(\frac{L'}{G'}\right)_{\text{Primeros 10 casos}} = 0.99 \approx 1, \quad \left(\frac{L'}{G'}\right)_{\text{6 casos Escondida}} = 21.47 \approx 21$$

Este resultado indica que para los primeros 10 casos, las tasas de aireación e irrigación, tenían una razón másica de uno es a uno. Por otro lado, para las tasas de aireación e irrigación de la pila de Escondida, la razón es de veintiuno es a uno. Esto último equivale a decir, que para los parámetros de escondida, la masa de líquido a calentar es muy grande en comparación con la masa de aire-vapor a ser responsable de este calentamiento, por lo que se hace imposible, con los actuales parámetros de aireación de escondida, calentar el flujo líquido descendiente. Aumentos en las tasas de aireación en pilas de biolixiviación, deben ser realizados para poder hacer practicable esta propuesta.

Se presentaron 2 posibles escenarios para mejorar la transferencia de calor entre la fase gaseosa y la líquida. Los que comprenden un aumento de 10 veces las tasas de aireación de escondida, además de una temperatura de entrada de 100 °C para la mezcla aire-vapor, llegando a la conclusión de que el segundo escenario es económicamente más rentable.

La evaluación económica del escenario propuesto, concluye con un valor actual neto de \$ 9,695,251 USD, además de un buen resultado en la tasa interna de retorno de un 34% y un IVAN de 58%, lo que avala la solvencia económica de ésta mejora presentada. Se concluye que más simulaciones que consideren la recirculación que existe del ácido deben ser desarrolladas a futuro.

Como se mencionó en las discusiones, a nivel mineralógico, el estudio empírico de la porosidad y microestructura del material mineral sulfurado y oxidado presente en una pila de biolixiviación, es absolutamente necesario para continuar futuros estudios. Se ha determinado por medio del modelo, que la variable de mayor sensibilidad en los resultados, corresponde al coeficiente de empaque asociado al mineral, por lo que una obtención de este valor de manera empírica, se hace necesaria para una mayor solidez del modelo. Este parámetro, comparado con todos los demás, tales como porosidad del lecho y diámetro promedio de partículas en el lecho, es el más relevante en términos de transferencia de calor y masa entre los tres mencionados.

Al existir un perfil de temperatura a lo largo del lecho mineral, se concluye que también se encuentra implícito un perfil de familia microbiológica a lo largo de los lechos. Presentándose en la mayoría de los casos estudiados en esta memoria, microorganismos mesófilos hacia las zonas superiores de los lechos y termófilos moderados cercanos a las zonas inferiores de los lechos minerales.

Un cuarto anexo (anexo D), fue desarrollado para discutir la sensibilidad del modelo, para así dejar mayor claridad de la metodología de cálculo utilizada, además de la propuesta para posibles mejoras a implementar en el modelo mismo para futuros estudios. Estas propuestas se resumen en extender el modelo para resolver el problema transiente en los procesos de humidificación, además de incluir las ecuaciones de transferencia pertinentes a la fase sólida del lecho mineral.

Estudios a futuro realizados con estas mejoras en el modelo, son los que darán mayor solidez y seguridad a una futura inversión en esta área.

## Referencias

- [1] **Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO)**. *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales*. 1987-2007.
- [2] **CEPAL**. *El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile*. 2000.
- [3] **Valerio, O. E.** *Evaluación energética de la biolixiviación de sulfuros de baja ley en anglo american sur, división los bronces*. 2008.
- [4] **M. Sidborn, J. Casas, J. Martínez, L. Moreno**. *Two-dimensional dynamic model of copper sulphide ore bed*. s.l. : Hydrometallurgy, 2003.
- [5] **Barlett, R.** *Solution Mining Leaching and Fluid Recovery of Minerals, 2nd ed.* 1998. pág. 472.
- [6] **Dixon, D. G.** *Introduction to heap leach practice and theory*. 2003. University of British Columbia.
- [7] **N. Pradhan, K.C. Nathsarma, R.K. Srinivsa**. *Heap bioleaching of chalcopyrite*. s.l. : Mineral Engineering, 2008. págs. 355-365. 21.
- [8] **R. Perry, D. Green**. *Perry's chemical engineers handbook*. s.l. : McGraw-Hill Book Co, 1999.
- [9] **R. Hammack, H. Edenborn, L. Brickett**. *A bioleaching survey of north american copper ores*. U.S. Bureau of Mines. 1995.
- [10] **M. Boon, G. Hansford, J. Heijnen**. *The role of bacterial ferrous iron oxidation in the biooxidation of pyrite*. 1995.
- [11] **M.J. Leahy, M.R. Davidson y M.P. Schwarz**. *A model for heap bioleaching of chalcocite with heat balance: Mesophiles and moderate thermophiles*. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne. 2007.
- [12] **D. Readett, L. Sylwerstrzak**. *The life cycle of a chalcocite heap bioleach system*. s.l. : Hydrometallurgy, 2003. págs. 365-374.
- [13] **P. Norris, N. Burton**. *Acidophiles in bioreactor mineral processing*. s.l. : Extremophiles, 2000. págs. 71-76.
- [14] **M. Scott, D. Sutton**. *Comparative leaching of chalcopyrite by selected acidophilic bacteria and archaea*. s.l. : Geomicrobiology, 2003. págs. 215-230.
- [15] **J. Casas, T. Vargas**. *Bioleaching model of a copper-sulphide ore bed in heap and dump configurations*. s.l. : Metallurgical and Material Transactions, 1998. págs. 899-909.
- [16] **M.J. Leahy, M.R. Davidson**. *A model for heap bioleaching of chalcocite with heat balance: Bacterial temperatura dependence*. 2005.
- [17] Wikipedia. [En línea] <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermophile>.
- [18] **Monardes, J.F.** *Dibujo Técnico 3D, Google SketchUp*.

- [19] **Lizama, H.** *Copper bioleaching behaviour in an aerated heap*. 2000.
- [20] **Abengoa Solar.**  
[http://www.abengoasolar.com/sites/solar/en/technologies/industrial\\_applications/stream/index.html](http://www.abengoasolar.com/sites/solar/en/technologies/industrial_applications/stream/index.html).  
[En línea]
- [21] **Kalogirou, S.A.** *Solar thermal collectors and applications*. s.l. : Prog. Energy Combust. Sci., 2004. págs. 231-295.
- [22] **Buck, Andrew.** Wikipedia. [En línea] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Parabolic\\_trough.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Parabolic_trough.svg).
- [23] **O. García, N. Velázquez.** *Numerical simulation of parabolic trough solar collector: improvement using counter flow concentric circular heat exchangers*. s.l. : International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. págs. 597-609.
- [24] **Shankbone, David.** Wikipedia. [En línea]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar\\_troughs\\_in\\_the\\_Negev\\_desert\\_of\\_Israel.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_troughs_in_the_Negev_desert_of_Israel.jpg).
- [25] **Bosecker, K.** *Bioleaching metal solubilization by microorganisms*. s.l. : FEMS Microbiology Reviews, 1997. págs. 591-604.
- [26] **A. Yahya, D. Johnson.** *Bioleaching of pyrite at low pH and low redox potentials by novel mesophilic gram-positive bacteria*. s.l. : Hydrometallurgy, 2002. págs. 181-188.
- [27] **Rawlings, D.E.** *Heavy metal mining using microbes*. s.l. : Microbiology, 2002. págs. 65-91.
- [28] **D.A. Nield, A. Benjan.** *Convection in Porous Media*. 2006.
- [29] **Treybal, R.E.** *Operaciones de Transferencia de Masa*. 1980. págs. 247-294. Vol. II, Capítulo 7: Operaciones de Humidificación.
- [30] **Cabe, W. Mc.** *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 1998. págs. 767-796. Vol. IV, Capítulo 19: Operaciones de humidificación.
- [31] **Cengel, Y.A.** *Transferencia de Calor*. 2000. pág. 758. Tabla A-9.
- [32] Engineering Tool Box. [En línea] [http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d\\_156.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html).
- [33] **H. Neuburg, T. Vargas.** *A model for the bacterial leaching of copper sulphide ores in pilot-scale columns*. s.l. : International Journal of Mining and Processing, 1991. págs. 247-264.
- [34] **Emol Económicos.** Emol. [En línea] [Citado el: 17 del Nov. de 2009.]  
<http://www.economiaynegocios.cl/mercados/monedas.asp>.

## Anexo A – Datos de entrada utilizados para la simulación en el programa de MATLAB

Para resolver el modelo expuesto, fue necesario conocer las capacidades caloríficas del aire y del vapor de agua, además de la viscosidad dinámica para la mezcla gaseosa y la líquida. La presión de saturación del vapor como también la conductividad térmica y el número de Prandtl de la fase líquida, además de la humedad absoluta de saturación de la mezcla aire-vapor fueron necesarios. Cada uno de los parámetros mencionados anteriormente, son funciones dependientes de las respectivas temperaturas de operación, como se muestra en las tablas A1.1 – A1.8.

T [C]	C <sub>pA</sub> [J/kg·C]
20	1867
30	1875
40	1885
50	1900
60	1916
70	1936
80	1962
90	1993
100	2029
110	2071
120	2120
130	2177
140	2244
150	2314
160	2420
170	2490
180	2590
190	2710
200	2840
220	3110
240	3520
260	4070
280	4835
300	5980
320	7900

Tabla A1.1: Capacidad calorífica del vapor de agua [31].

T [C]	C <sub>pB</sub> [J/kg·C]
20	1005
40	1005
60	1009
80	1009
100	1009
120	1013
140	1013
160	1017
180	1022
200	1026
250	1034
300	1047
350	1055
400	1068

Tabla A1.2: Capacidad calorífica del aire [32].

T [C]	μ <sub>G</sub> [kg/m·s] x 10 <sup>5</sup>
20	1.82
40	1.91
60	2.02
80	2.09
100	2.18
120	2.27
140	2.35
160	2.43
180	2.52
200	2.58
250	2.78
300	2.95
350	3.12
400	3.28

Tabla A1.3: Viscosidad dinámica del aire [32].

T [C]	μ <sub>L</sub> [kg/m·s] x 10 <sup>4</sup>
15	11.38
20	10.02
25	8.91
30	7.98
35	7.20
40	6.53
45	5.96
50	5.47

Tabla A1.4: Viscosidad dinámica del agua líquida [31].



T [C]	$k_{th}$ [W/m·C]
15	0.589
20	0.598
25	0.607
30	0.615
35	0.623
40	0.631
45	0.637
50	0.644

Tabla A1.5: Conductividad térmica del agua líquida [31].

T [C]	$Pr_L$ [-]
15	8.09
20	7.01
25	6.14
30	5.42
35	4.83
40	4.32
45	3.91
50	3.55

Tabla A1.6: Número de Prandtl del agua líquida [31].

T [C]	$P_{sat}$ [atm]x10 <sup>3</sup>
15	16.78
20	22.70
25	31.58
30	42.44
35	55.27
40	75.99
45	94.74
50	123.36
55	154.94
60	197.38
65	246.73
70	308.90
75	380.94
80	468.78
85	570.43
90	690.83
95	833.93
100	1000.03

Tabla A1.7: Presión de saturación del vapor de agua [31].

<b>T [C]</b>	<b>Yi [kg H2O/kg aire]x10<sup>4</sup></b>
<b>10</b>	76.00
<b>12</b>	87.00
<b>14</b>	100.00
<b>16</b>	114.00
<b>18</b>	129.00
<b>20</b>	147.00
<b>22</b>	167.00
<b>24</b>	189.00
<b>26</b>	214.00
<b>28</b>	241.00
<b>30</b>	272.00
<b>32</b>	307.00
<b>34</b>	345.00
<b>36</b>	388.00
<b>38</b>	436.00
<b>40</b>	489.00

Tabla A1.8: Humedad absoluta de saturación de la mezcla gaseosa, aire-vapor de agua a 1 atm std [31].

Basándose en los datos de las tablas A1.1 a la A1.8, es como se generaron las funciones polinómicas para cada uno de estos parámetros. De esta forma, estas funciones fueron fáciles de implementar en la simulación del modelo de transferencia realizado en esta memoria de título. Estas últimas funciones se encuentran de manera explícita en los gráficos A1.1 al A1.8, expuestos a continuación.

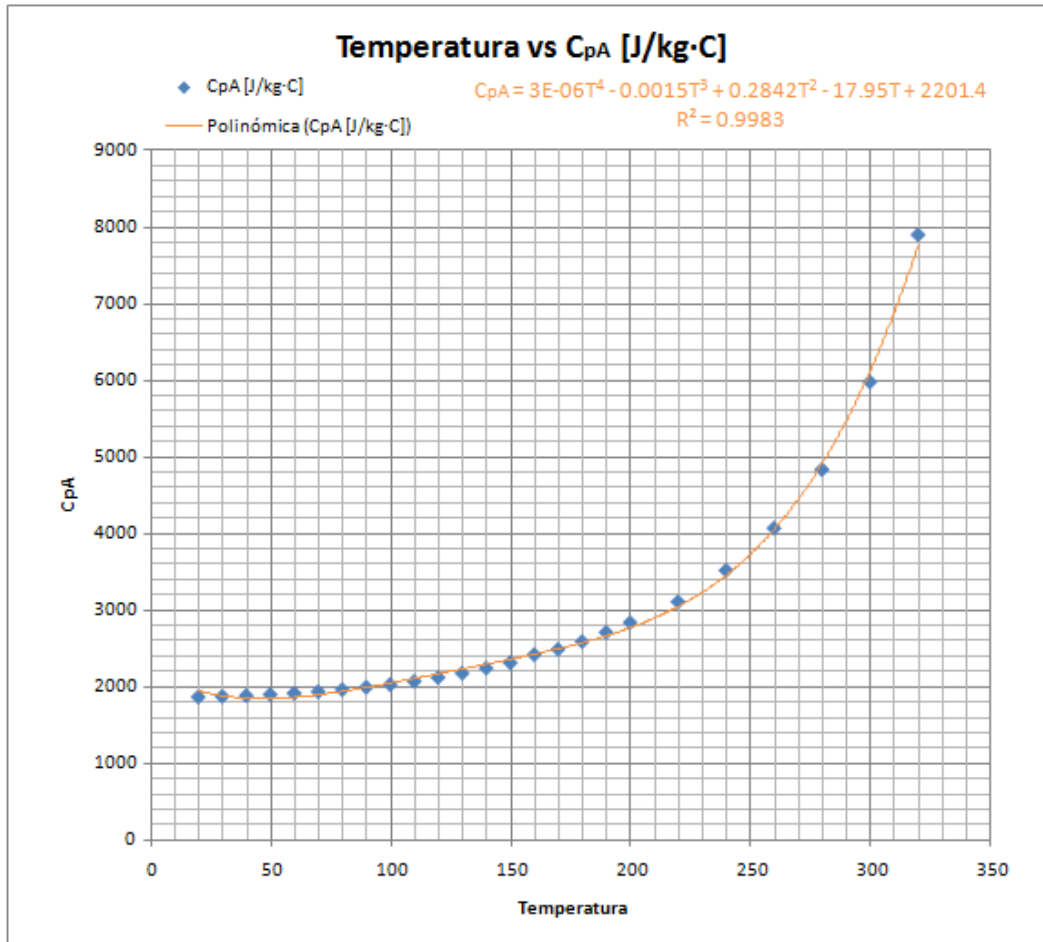


Gráfico A1.1: Capacidad calorífica del vapor de agua, datos tabla A1.1.

Del gráfico A1.1, se obtiene la regresión lineal que define una función para la capacidad calorífica del vapor de agua, para las temperaturas entre 20 y 320°C. La ecuación A1.1 muestra esta función polinómica.

$$C_{pA}(T) = (3E - 06)T^4 - (.0015)T^3 + (.2842)T^2 - (17.95)T + 2201.4$$

(Ec. A1.1)

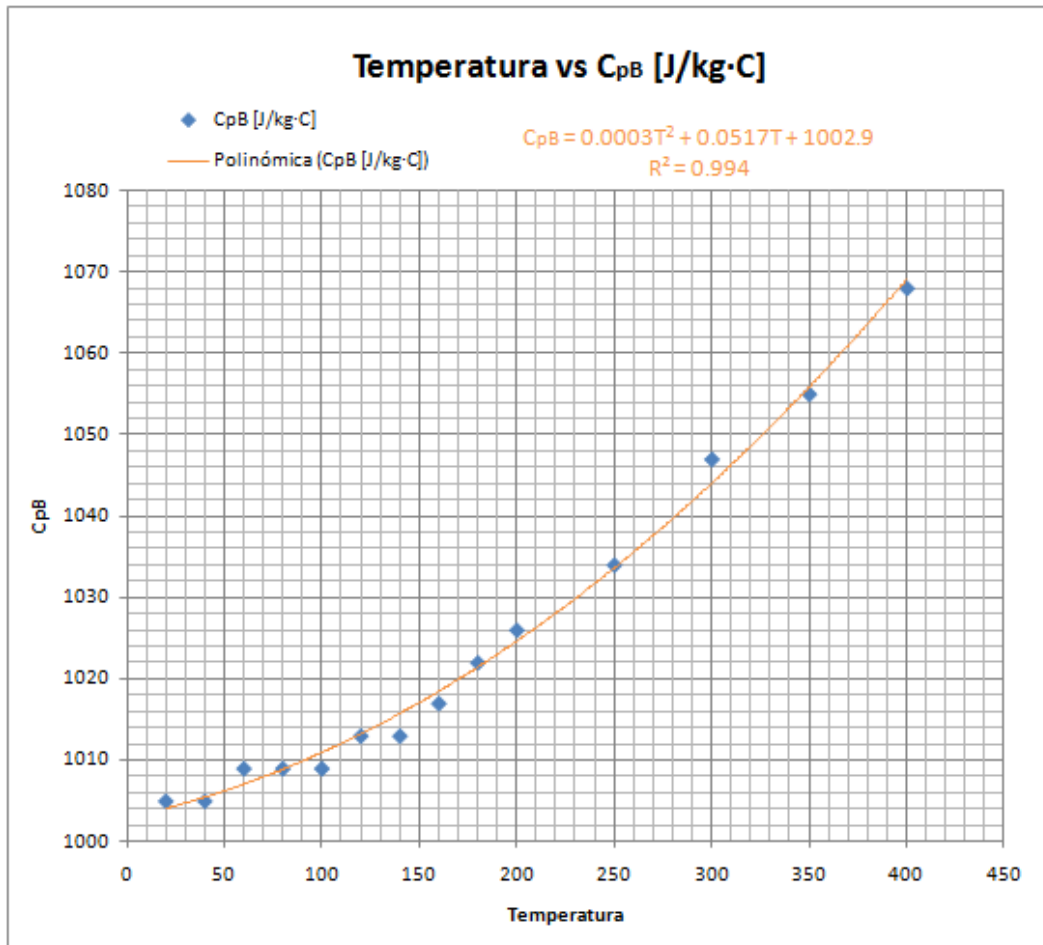


Gráfico A1.2: Capacidad calorífica del aire, datos tabla A1.2.

Del gráfico A1.2, se obtiene la regresión lineal que define una función para la capacidad calorífica del aire, para las temperaturas entre 20 y 400°C. La ecuación A1.2 muestra esta función polinómica.

$$C_{pB}(T) = (.0003)T^2 + (.0517)T + 1002.9$$

(Ec. A1.2)

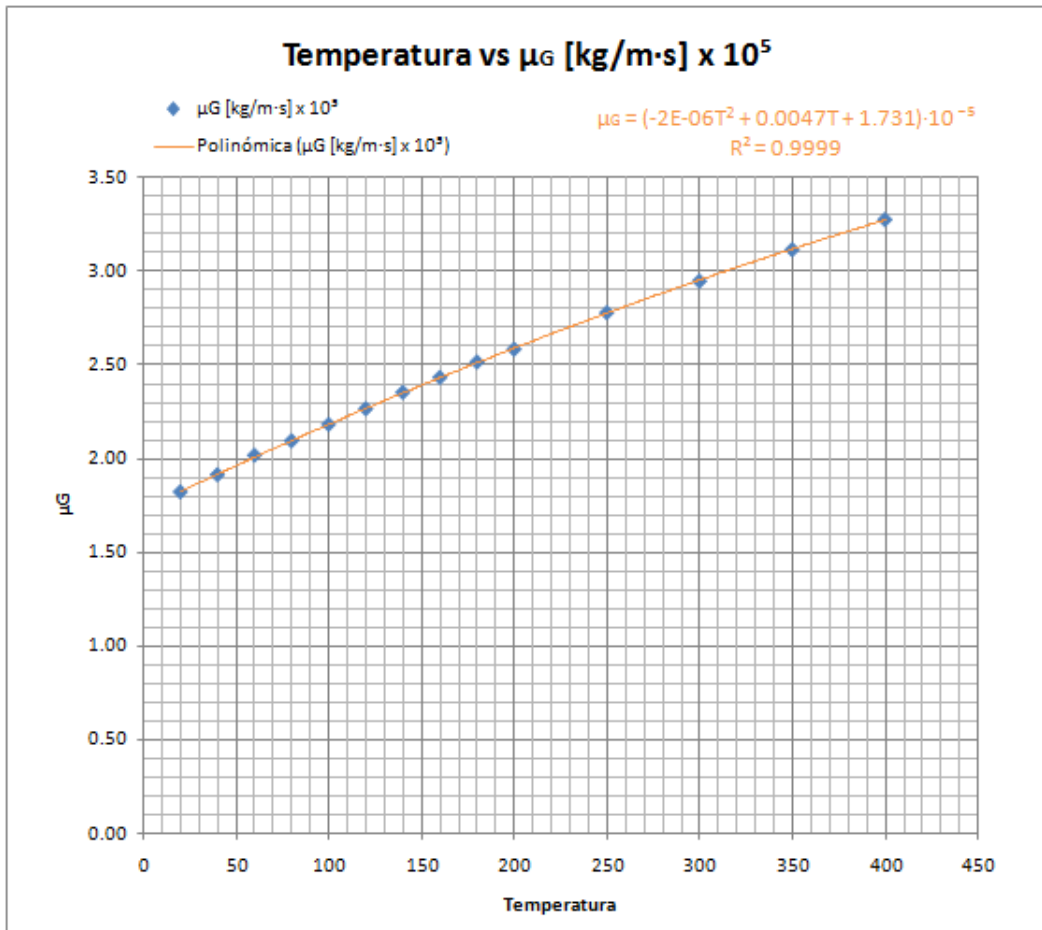


Gráfico A1.3: Viscosidad dinámica del aire, datos tabla A1.3.

Del gráfico A1.3, se obtiene la regresión lineal que define una función para la viscosidad dinámica del aire, para las temperaturas entre 20 y 400°C. La ecuación A1.3 muestra esta función polinómica.

$$\mu_G(T) = \{(-2E - 06)T^2 + (.0047)T + 1.731\} \cdot 10^{-5}$$

(Ec. A1.3)

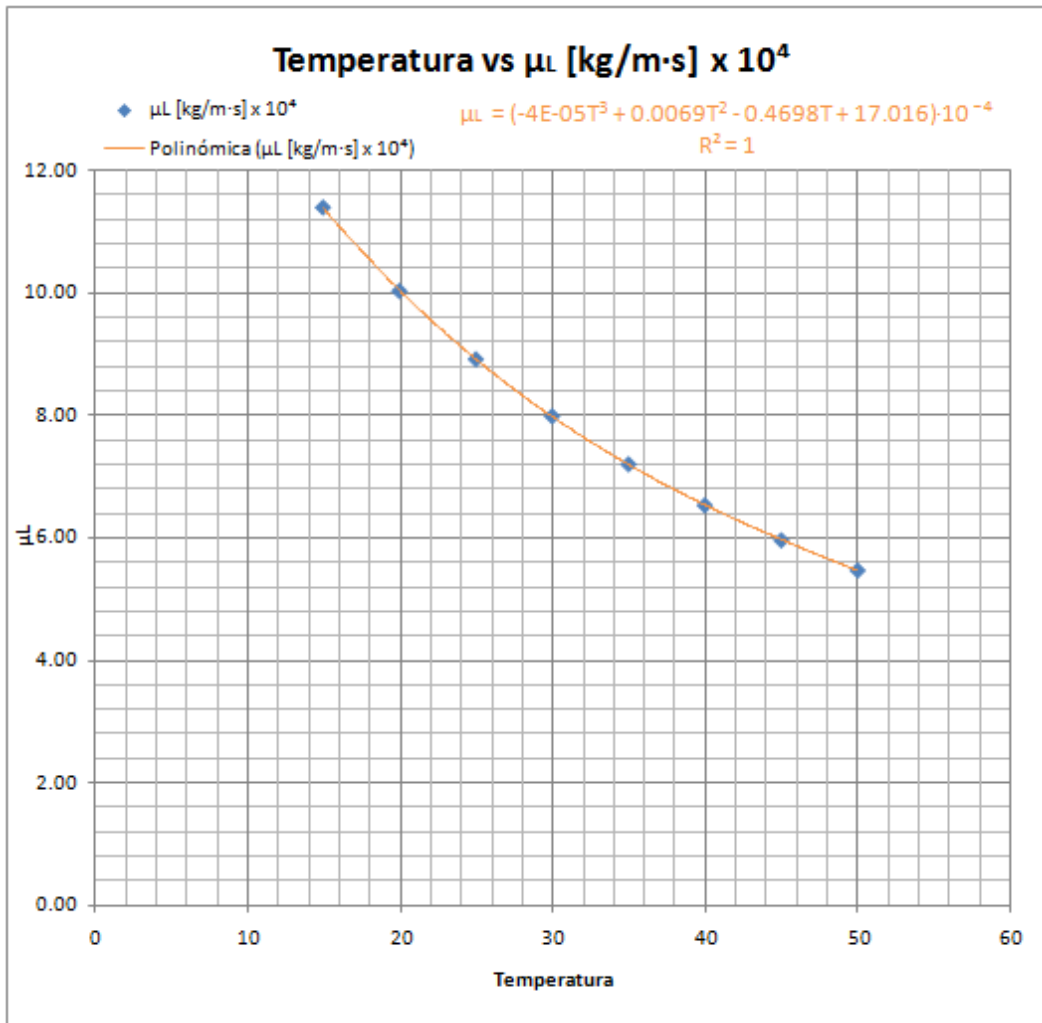


Gráfico A1.4: Viscosidad dinámica del agua líquida, datos tabla A1.4.

Del gráfico A1.4, se obtiene la regresión lineal que define una función para la viscosidad dinámica del agua líquida, para las temperaturas entre 15 y 50°C. La ecuación A1.4 muestra esta función polinómica.

$$\mu_L(T) = \{-4E - 05\}T^3 + \{.0069\}T^2 - \{.4698\}T + 17.02\} \cdot 10^{-4}$$

(Ec. A1.4)

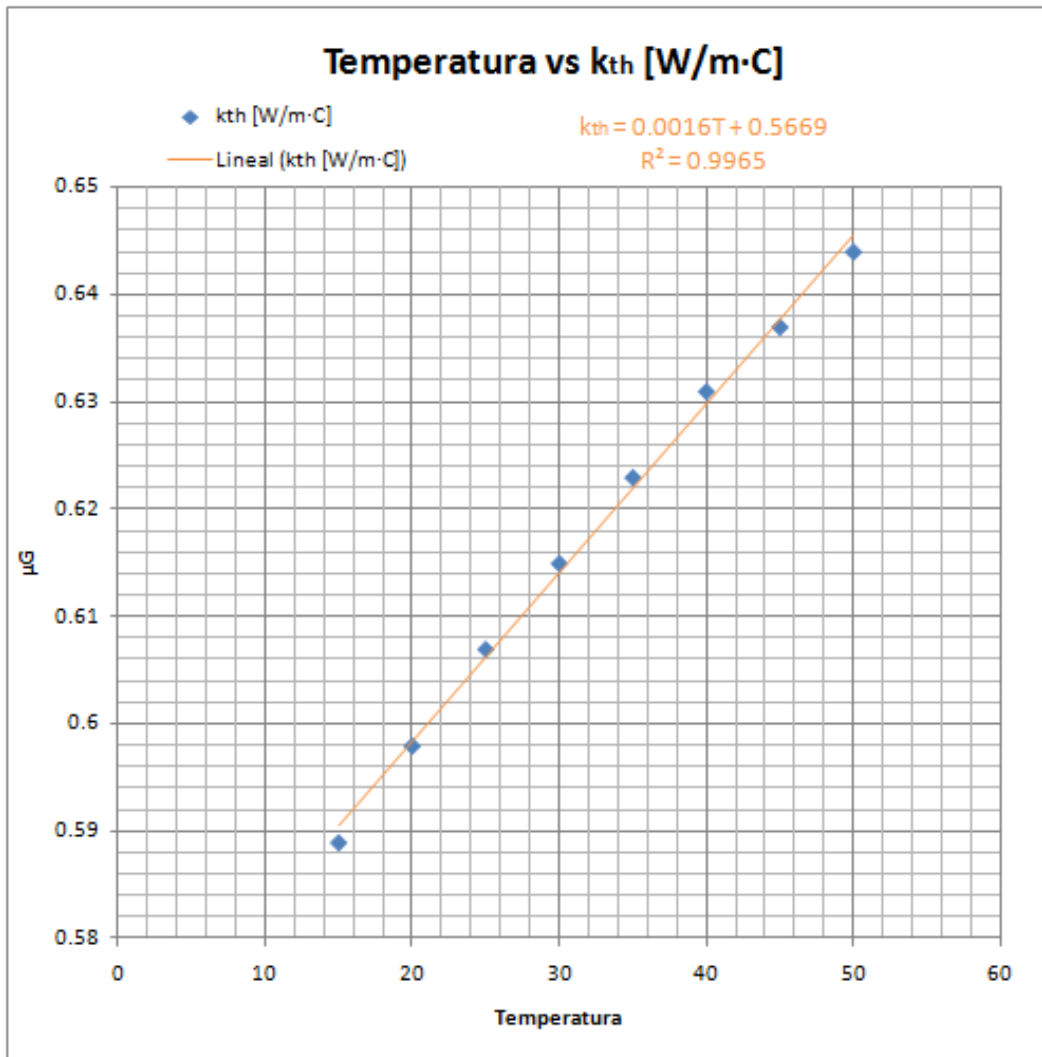


Gráfico A1.5: Conductividad térmica del agua líquida, datos tabla A1.5.

Del gráfico A1.5, se obtiene la regresión lineal que define una función para la conductividad térmica del agua líquida, para las temperaturas entre 15 y 50°C. La ecuación A1.5 muestra esta función polinómica.

$$k_{th}(T) = (.0016)T + .5669$$

(Ec. A1.5)

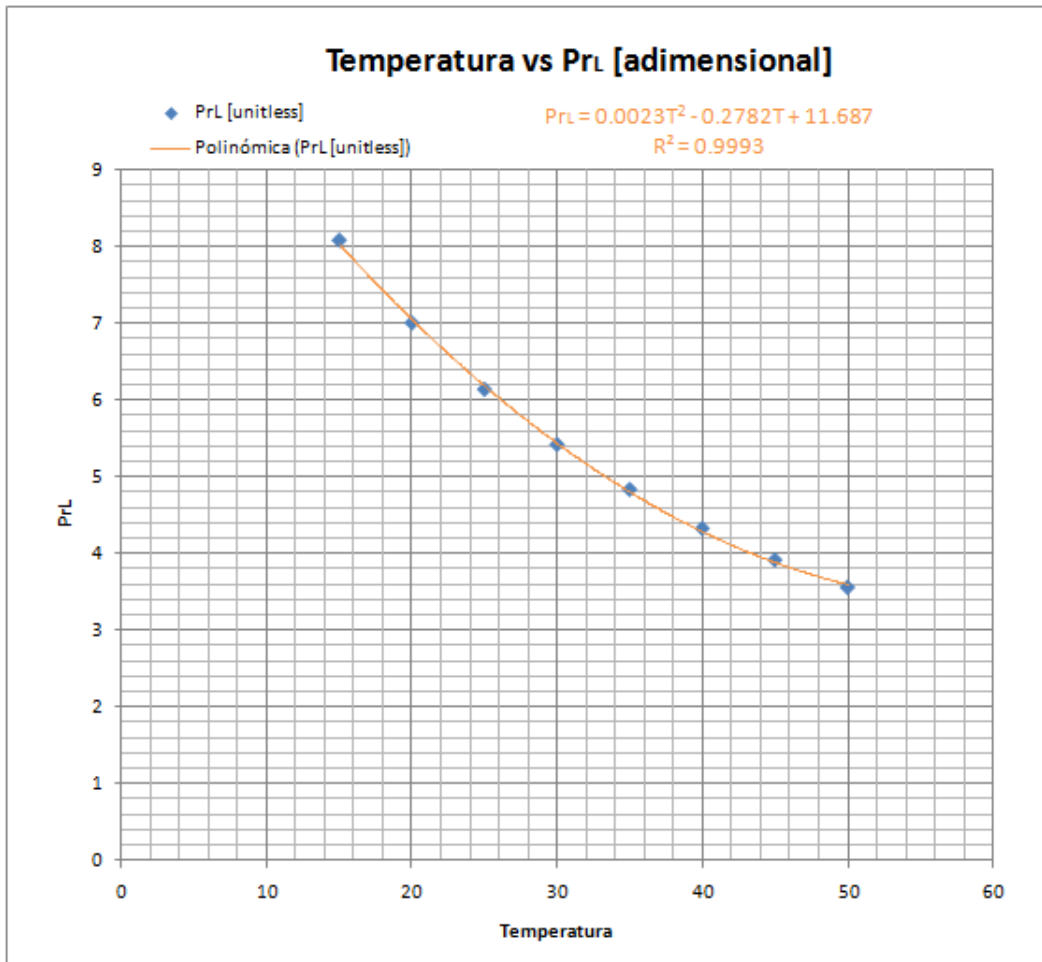


Gráfico A1.6: Número de Prandtl del agua líquida, datos tabla A1.6.

Del gráfico A1.6, se obtiene la regresión lineal que define una función para el número de Prandtl del agua líquida, para las temperaturas entre 15 y 50°C. La ecuación A1.6 muestra esta función polinómica.

$$Pr_L(T) = (.0023)T^2 - (.2782)T + 11.69$$

(Ec. A1.6)



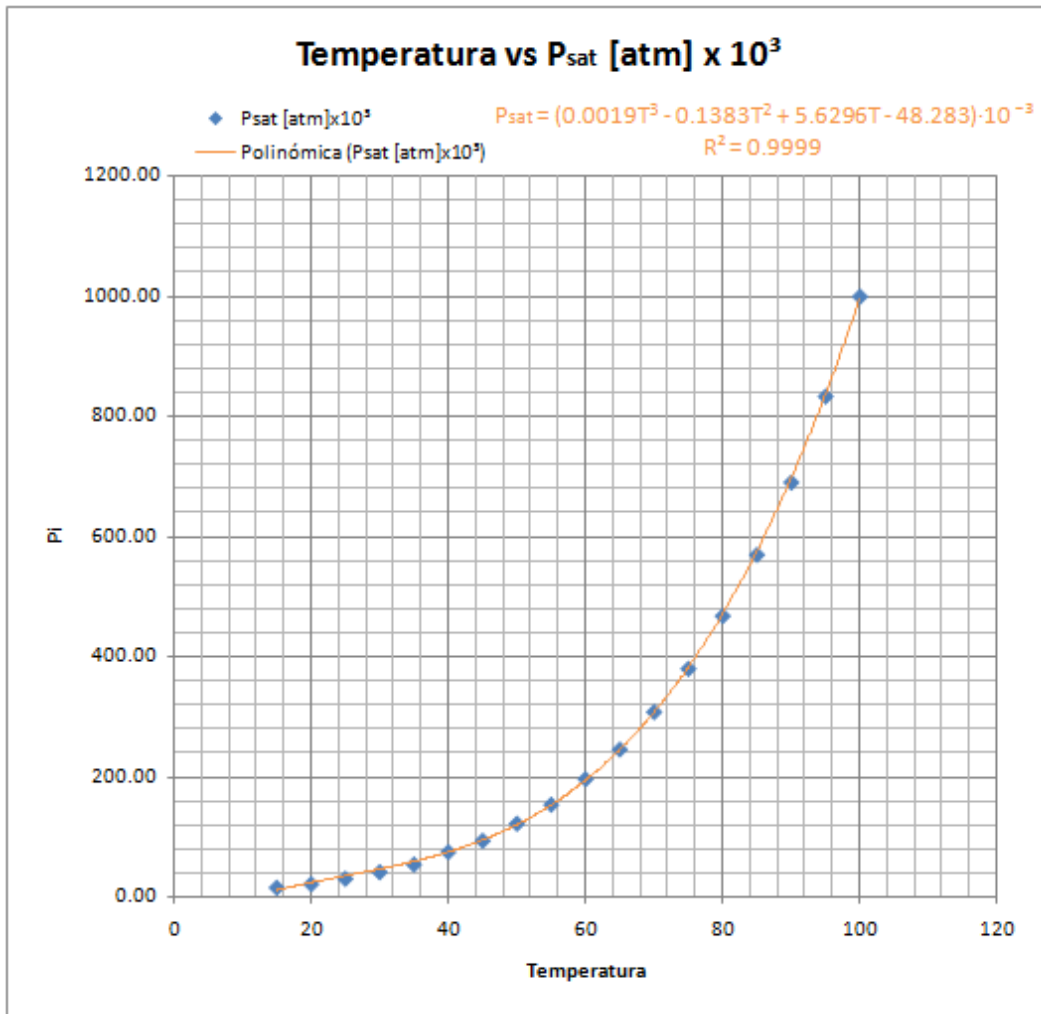


Gráfico A1.7: Presión de saturación del vapor de agua, datos tabla A1.7.

Del gráfico A1.7, se obtiene la regresión lineal que define una función para la presión de saturación del vapor de agua, para las temperaturas entre 15 y 100°C. La ecuación A1.7 muestra esta función polinómica.

$$p_{sat}(T) = \{(0.0019)T^3 - (0.1383)T^2 + (5.6296)T - 48.28\} \cdot 10^{-3}$$

(Ec. A1.7)

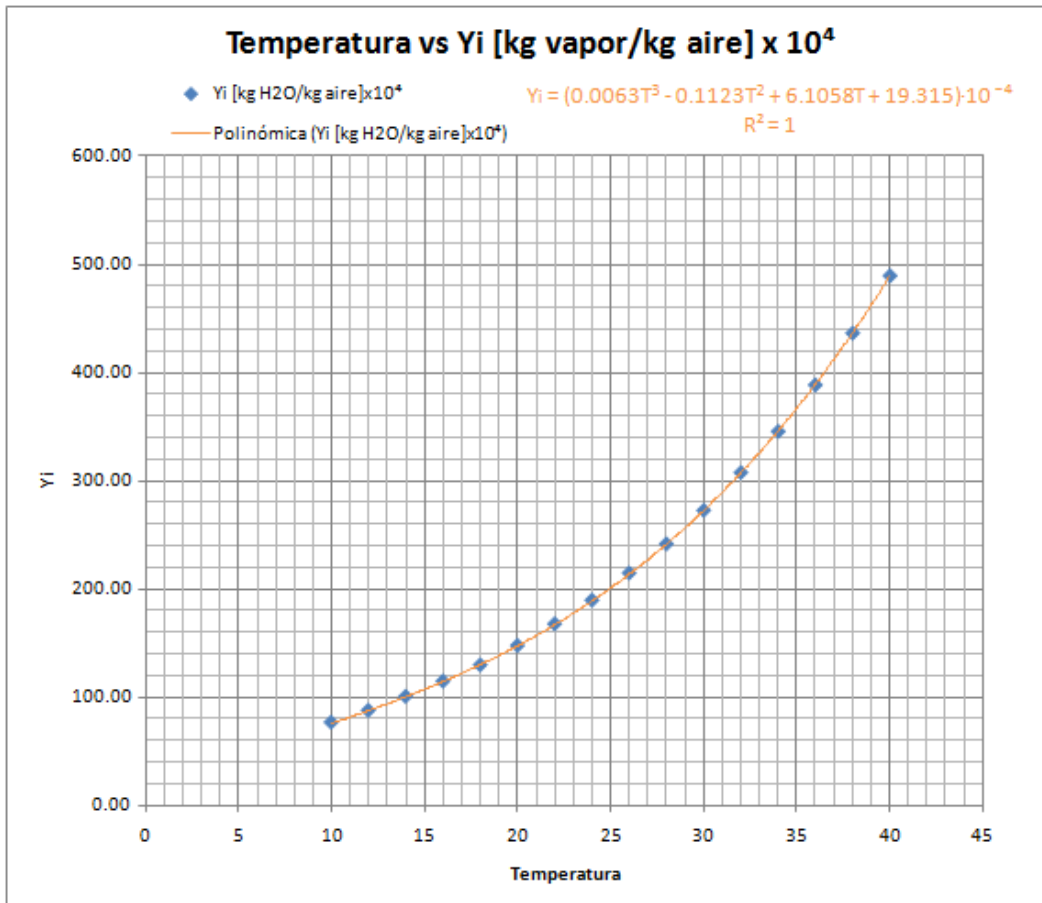


Gráfico A1.8: Humedad absoluta de saturación de la mezcla aire-vapor de agua, datos tabla A1.8.

Del gráfico A1.8, se obtiene la regresión lineal que define una función para la humedad absoluta de saturación de la mezcla aire-vapor de agua, para las temperaturas entre 10 y 40°C. La ecuación A1.8 muestra esta función polinómica.

$$Y_{sat,100\%}(T) = \{(0.0063)T^3 - (0.1123)T^2 + (6.1058)T - 19.32\} \cdot 10^{-4}$$

(Ec. A1.8)

## Anexo B – Algoritmo

El algoritmo utilizado responde a la dinámica de cálculo del ejemplo 7.14 del libro “Operaciones de transferencia de masa” de Robert E. Treybal correspondiente al capítulo 7 de operaciones de humidificación.

Como se mencionó en el capítulo 3, las ecuaciones 1.2 a la 1.20, son resueltas para un diferencial de lecho relleno, como el de la figura 3.2.

El algoritmo implementado en este modelo, es un algoritmo que calcula alturas de lechos rellenos minerales, para determinadas condiciones de temperatura y humedad de salida de la mezcla gaseosa inyectada por un sistema de aireación. Utilizando apropiadamente este modelo, es como se pueden obtener alturas de lechos rellenos próximos a los 10 metros de altura y así analizar estos para cada uno de los casos estudiados.

El algoritmo trabaja seccionando el lecho relleno k-veces, esto se realiza estableciendo un vector de largo k el cual posee los diferenciales de temperatura del gas para llevarlo de su temperatura de entrada, hasta su temperatura de enfriamiento, la cual es posible de obtener luego de un método de prueba y error. Se define el vector

$$\{\Delta T_G\}_k = \{\Delta T_{G,1} \Delta T_{G,2} \dots \Delta T_{G,k-1} \Delta T_{G,k} \dots \Delta T_{G,n}\} \quad (\text{Ec. A2.1})$$

Luego para cada intervalo  $\Delta z_k$ , de la figura 3.2 se calcula lo siguiente:

$$T_{G,k} = T_{G,k-1} + \Delta T_{G,k} \quad (\text{Ec. A2.2})$$

$$\Delta z_k = \frac{\Delta T_{G,k}}{\left. \frac{dT_G}{dz} \right|_{k-1}} \quad (\text{Ec. A2.3})$$

$$Y'_k = Y'_{k-1} + \left( \frac{dY'}{dz} \right)_{k-1} \Delta z_k \quad (\text{Ec. A2.4})$$

$$\bar{p}_{AG,k} = \frac{Y'_k}{Y'_k + M_A/M_B} \quad (\text{Ec. A2.5})$$

$$(C_{PS})_k = C_{PB}(T_{G,k}) + Y'_k C_{PA}(T_{G,k})^5$$

(Ec. A2.6)

$$L'_k = L'_{k-1} + G'_S(Y'_k - Y'_{k-1})$$

(Ec. A2.7)

$$T_{L,k} = T_0 + \frac{1}{L'_k C_{PA,L}} \{L'_{k-1} C_{PA,L} (T_{L,k-1} - T_0) + G'_S [C_{PS,k} (T_{G,k} - T_0) - C_{PS,k-1} (T_{G,k-1} - T_0) + (Y'_k - Y'_{k-1}) \lambda_0]\}$$

(Ec. A2.8)

La Ec. A2.8 corresponde a un balance de calor entre la fase líquida y la gaseosa en el diferencial entre el paso “k-1” y “k”, correspondiente al presentado en la figura 3.2. Como es posible de observar, el primer término dentro de las llaves corresponde al calor sensible del líquido en el paso “k-1” con respecto a la temperatura de referencia, el segundo término que se encuentra en corchetes, corresponde a los calores asociados a la mezcla gaseosa. Dentro de los corchetes es posible ver un primer término correspondiente al calor húmedo de la mezcla gaseosa en el paso “k” con respecto a la temperatura de referencia, un segundo término correspondiente al calor húmedo de la mezcla gaseosa en el paso “k-1” respectivo a la temperatura de referencia, y un tercer término que denota el calor latente del fenómeno de humidificación de la mezcla aire-vapor entre el paso “k-1” y “k”.

$$\mu_{G,k} = f n_2 (T_{G,k})^6$$

(Ec. A2.9)

$$F_{G,k} = \frac{1.195 G_S}{S C_G^{2/3}} \left[ \frac{G'_S d_S}{\mu_{G,k} (1 - \varepsilon_0)} \right]^{-0.36}$$

(Ec. A2.10)

$$h_{G,k} = C_{PS,k} M_B F_{G,k} (Le_G)^{2/3}$$

(Ec. A2.11)

$$k_{thL,k} = f n_3 (T_{L,k})^7$$

(Ec. A2.12)

---

<sup>5</sup> Revisar Ec. A1.1 y Ec. A1.2

<sup>6</sup> Revisar Ec. A1.3

<sup>7</sup> Revisar Ec. A1.5

$$\mu_{L,k} = fn_4(T_{L,k})^8$$

(Ec. A2.13)

$$Pr_{L,k} = fn_5(T_{L,k})^9$$

(Ec. A2.14)

$$h_{L,k} = 25.1 \frac{k_{thL,k}}{d_S} \left( \frac{d_S L'_k}{\mu_{L,k}} \right)^{0.45} (Pr_{L,k})^{0.5}$$

(Ec. A2.15)

Una vez calculadas las ecuaciones (Ec. A2.2) hasta la (Ec. A2.15) para un  $\Delta z_k$ , se realiza un procedimiento iterativo para encontrar la temperatura de interface en el punto k. Se comienza con

$$T_{i,k} = 30^\circ\text{C}$$

(Ec. A2.16)

$$p_{i,k} = fn_6(T_{i,k})^{10}$$

(Ec. A2.17)

$$\left( \frac{dY'}{dz} \right)_k = - \frac{M_A F_{G,k} a}{G'_S} \ln \left( \frac{1 - p_{i,k}}{1 - \bar{p}_{AG,k}} \right)$$

(Ec. A2.18)

$$(h'_G a)_k = - \frac{G'_S C_{PA,k} \left( \frac{dY'}{dz} \right)_k}{1 - \exp \left\{ G'_S C_{PA,k} \left( \frac{dY'}{dz} \right)_k \frac{1}{h_{G,k} a} \right\}}$$

(Ec. A2.19)

$$\left. \frac{dT_G}{dz} \right|_k = - \frac{(h'_G a)_k (T_{G,k} - T_{i,k})}{G'_S C_{PS,k}}$$

(Ec. A2.20)

---

<sup>8</sup> Revisar Ec. A1.4

<sup>9</sup> Revisar Ec. A1.6

<sup>10</sup> Revisar Ec. A1.7

$$(indT_i) = T_{L,k} + \frac{G'_S \left\{ C_{PS,k} \frac{dT_G}{dz} \Big|_k + \left( \frac{dY'}{dz} \right)_k [C_{PA,k} T_{G,k} - C_{PAL,k} T_{L,k} + (C_{PAL,k} - C_{PA,k}) T_0 + \lambda_0] \right\}}{G'_S C_{PAL,k} \left( \frac{dY'}{dz} \right)_k - h_L a}$$

(Ec. A2.21)

Luego

$$T_{i,k} = (indT_i)$$

(Ec. A2.22)

La búsqueda iterativa de  $T_{i,k}$  entre las ecuaciones (Ec. A2.17) y (Ec. A2.22) termina cuando se cumple que

$$|T_{i,k} - (indT_i)| \leq 0.001$$

(Ec. A2.23)

El trabajo para cada una de estas variables es basado en espacios vectoriales, para lo cual se generan vectores que almacenan los resultados obtenidos en cada uno de los k-pasos.

## Anexo C – Resultados del Modelo

### Temperaturas inferiores y superiores para cada uno de los 10 casos

A continuación se presentan los resultados para las temperaturas superiores e inferiores para cada uno de los 10 casos simulados con los parámetros de la tabla 4.1.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	20	16.22
$T_L$ [°C]	13.73	18.05

Tabla A3.1: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 1.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	20	18.35
$T_L$ [°C]	17.54	18.50

Tabla A3.2: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 2.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	100	19.50
$T_L$ [°C]	27.82	18.10

Tabla A3.3: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 3.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	100	20.50
$T_L$ [°C]	45.41	17.03

Tabla A3.4: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 4.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	100	24
$T_L$ [°C]	52.01	17

Tabla A3.5: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 5.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	100	27
$T_L$ [°C]	55.28	17.24

Tabla A3.6: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 6.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	315	20
$T_L$ [°C]	51.46	18.09

Tabla A3.7: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 7.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	315	15
$T_L$ [°C]	63.47	18.23

Tabla A3.8: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 8.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	315	12
$T_L$ [°C]	65.33	18.02

Tabla A3.9: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 9.

Temperaturas en los puntos de entrada y salida		
	Zona inferior	Zona Superior
$T_G$ [°C]	315	12
$T_L$ [°C]	67.30	18

Tabla A3.10: Resumen de temperaturas en zonas inferior y superior de lecho mineral; Caso 10.

Es posible observar que la temperatura superior del líquido en las tablas A3.1 – A3.10, no son siempre 18 °C fijos. Esto se debe a la imprecisión de la metodología de cálculo del modelo, en poder mantener esta condición de borde.

### Ilustraciones de la transferencia de calor y masa, a lo largo del lecho para cada uno de los 10 casos.

La figura A3.1, ilustra el comportamiento de los fenómenos de transferencia a lo largo del lecho de 10 metros para los casos 1 y 2. Las figuras A3.2 – A3.7 corresponden al comportamiento de los fenómenos de transferencia para los 8 casos restantes.



Figura A3.1: Ilustración de la transferencia de calor y masa a lo largo del lecho mineral; Caso 1 y 2.



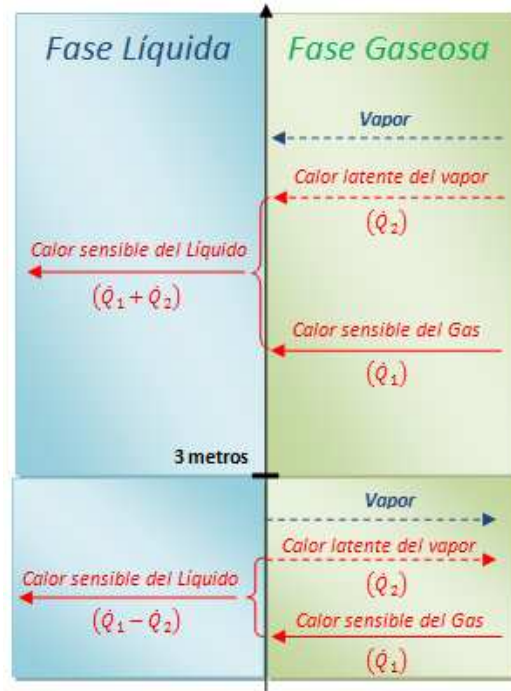


Figura A3.2: Ilustración de la transferencia de calor y masa a lo largo del lecho mineral; Caso 3.

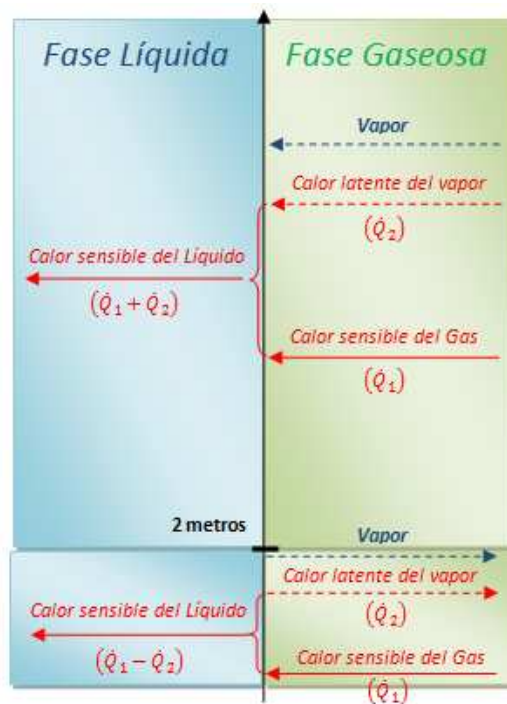


Figura A3.3: Ilustración de la transferencia de calor y masa a lo largo del lecho mineral; Caso 4, 5 y 6.

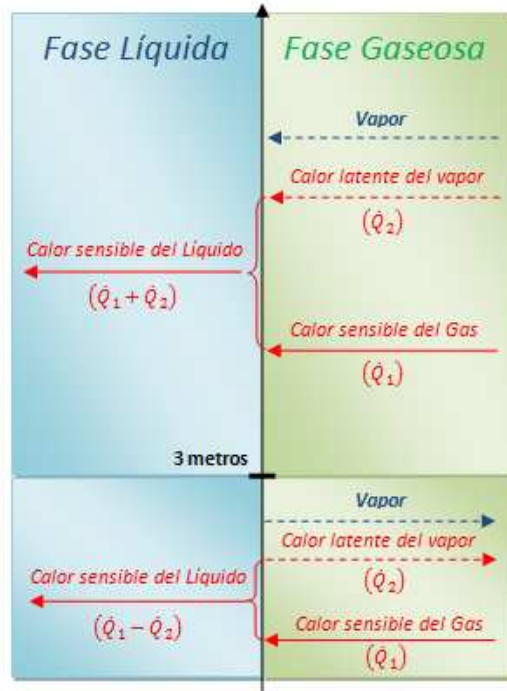


Figura A3.4: Ilustración de la transferencia de calor y masa a lo largo del lecho mineral; Caso 7.

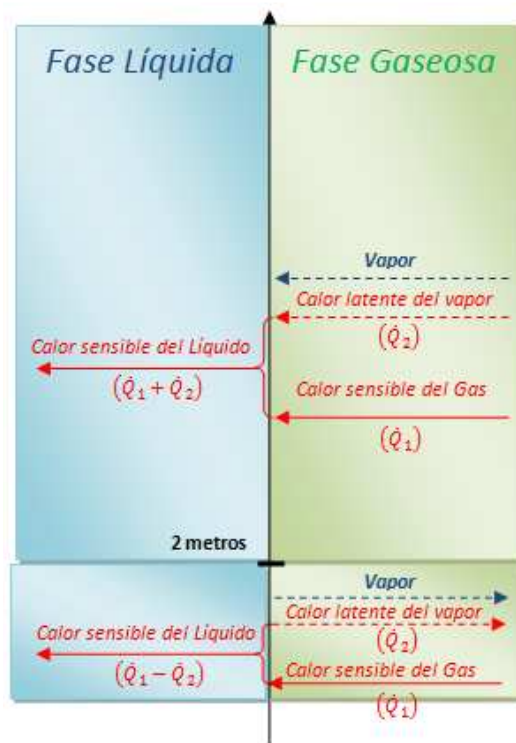


Figura A3.5: Ilustración de la transferencia de calor y masa a lo largo del lecho mineral; Caso 8.

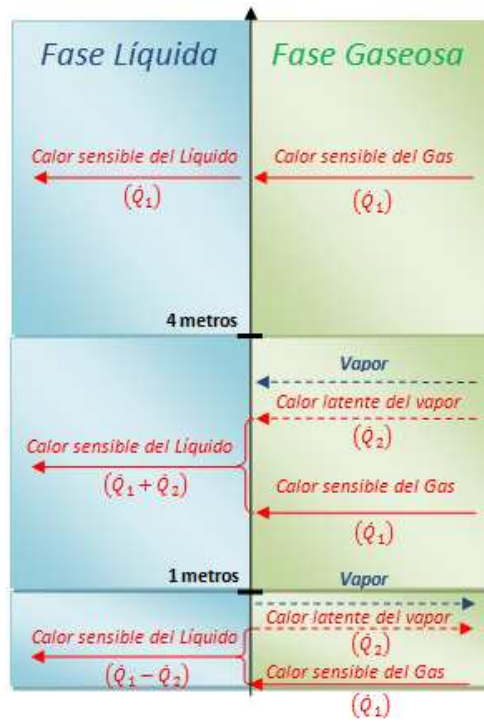


Figura A3.6: Ilustración de la transferencia de calor y masa a lo largo del lecho mineral; Caso 9.

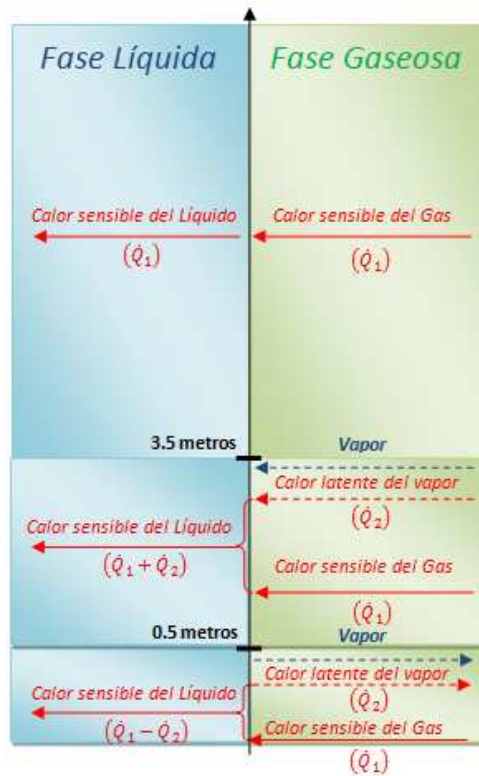


Figura A3.7: Ilustración de la transferencia de calor y masa a lo largo del lecho mineral; Caso 10.

## Anexo D – Sensibilidad del Modelo

El modelo matemático de esta tesis, corresponde a un método utilizado en la ingeniería química desde hace más de un par de décadas atrás. El algoritmo de este método es complicado y tedioso, pero desde el punto de vista de la teoría en humidificación, este es el método que mejor explica y representa los fenómenos de transferencia, presentes entre una fase gaseosa y una líquida a lo largo de un lecho relleno.

Técnicamente el método utilizado por el modelo, se define como uno que obtiene alturas de lechos rellenos, por medio de una discretización de la temperatura de la mezcla gaseosa a medida que esta se va enfriando a lo largo del lecho mineral. Esta altura de lecho relleno, es posible de controlar por medio de las temperatura y humedad de salida que son determinadas para la mezcla gaseosa. Utilizando apropiadamente lo anterior, es como se puede establecer una altura de lecho fija para cada uno de los escenarios estudiados en esta memoria.

Existe sensibilidad en el supuesto de equilibrio entre la temperatura y humedad absoluta de salida de la mezcla gaseosa en el modelo. Si bien el modelo establece que para la mezcla aire-vapor que abandona el lecho relleno por su parte superior sale a una temperatura y humedad absoluta de equilibrio, es posible que en el fenómeno real, este último no se cumpla. Ya que es probable que una altura de 10 metros, no sea suficiente para lograr el equilibrio a la salida, es más, la velocidad del flujo gaseoso ascendente al igual que la altura de lecho relleno, son parámetros determinantes para que esta condición de equilibrio en el borde superior se cumpla. Lo que le quita precisión al modelo para representar el fenómeno físico real a lo largo del lecho mineral.

La condición de borde superior para la temperatura del líquido de riego, corresponde a un parámetro fijo en la partida del modelo, el cual debido a la mecánica misma de cálculo del algoritmo en el modelo es finalmente recalculado. Este proceso de re-cálculo tuvo en el peor de los casos, un error relativo no superior al 10%<sup>12</sup>, lo que se considera aceptable.

La condición establecida a la ecuación A2.23, presenta una sensibilidad en el caso de bajas temperaturas de interfase líquido-gas. La condición corresponde a la siguiente:

$$|T_{i,k} - (indT_i)| \leq 0.001$$

Esta condición es válida, únicamente porque las temperaturas de interfase entre la fase líquida y la gaseosa deben ser de a lo menos 1 orden de magnitud. Se tiene total conciencia de que para temperaturas bastantes pequeñas, cercanas a cero, matemáticamente existe la posibilidad de cumplir esta condición de manera errónea. Como por ejemplo si  $T_{i,k} = 0.002$  y  $(indT_i) = 0.001$ , se entiende que su diferencia cumplirá la condición y que físicamente esto será incongruente, ya que la primera es el doble de la segunda. Como existe conciencia de que los valores de la temperatura de interfase corresponden a valores reales mayores a 10 °C, se sabe que no existirán este tipo de problemas. Si en un

---

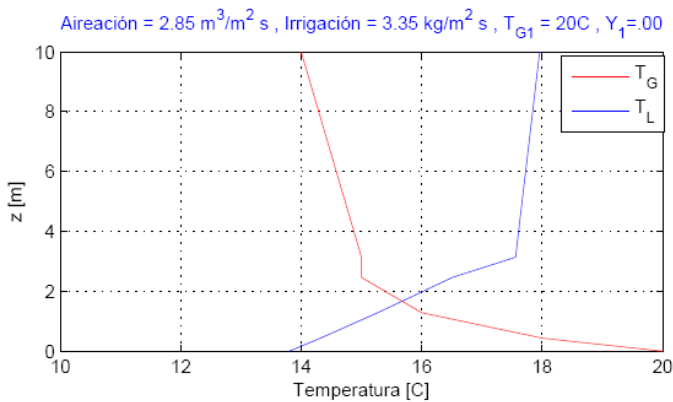
<sup>12</sup> Este 10% es equivalente a un error no mayor a 2.2 °C

modelamiento a futuro, este tipo de problema llegase a presentarse, se recomienda utilizar criterios de errores relativos, es decir, utilizar una condición con una estructura igual o similar a la siguiente:

$$\left| \frac{T_{i,k} - (indT_i)}{T_{i,k}} \right| \leq 0.001$$

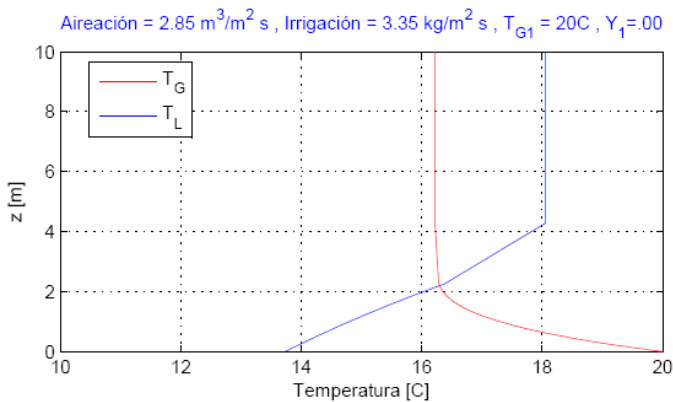
Se concluye que una de las posibles mejoras más relevantes del modelo, corresponden a la implementación de un control del error en los pasos del modelo. El método de control del error recomendado, corresponde al llamado “step doubling” (conocido en español como método de paso doble). Este método es capaz de establecer una reducción del error presentado en cada paso dado por el algoritmo de diferencias finitas, ya que fue posible observar inestabilidades utilizando distintos tamaños de pasos. A continuación se presenta un ejemplo gráfico de este error, con los gráficos A4.1 y A4.2.

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



**Gráfico A4.1: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor y de la solución de riego descendente, con una discretización de 8 pasos, de diferentes magnitudes.**

Temperatura de las fases gaseosa y líquida vs Altura de Mineral - Altura de Pila 10m



**Gráfico A4.2: Comportamiento de las temperaturas de la mezcla aire-vapor y de la solución de riego descendente, con una discretización de 10000 pasos, de magnitudes idénticas.**

## Anexo E – Flujos de Caja

El flujo de caja correspondiente al escenario estudiado se presenta en la tabla A5.1.

### [Escenario 2] Pila de biolixiviación de 2 hectáreas de superficie

<b>Flujo de Caja en USD\$</b>											
	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7	año 8	año 9	año 10
Ingresos x Cu extra		10,459,279	7,396,177	5,230,134	3,698,438	2,615,314	1,849,394	1,307,780	924,784	653,952	462,436
Costos Fijos (Mantencion PCP)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión	-16,607,271										
<b>Flujo de Caja privado</b>	<b>-16,607,271</b>	<b>10,459,279</b>	<b>7,396,177</b>	<b>5,230,134</b>	<b>3,698,438</b>	<b>2,615,314</b>	<b>1,849,394</b>	<b>1,307,780</b>	<b>924,784</b>	<b>653,952</b>	<b>462,436</b>
Tasa de Descuento	10%										
VAN	9,695,251										
TIR	34%										
IVAN	0.58										

Tabla A5.1: Flujo de caja para escenario 2 – 2 hectáreas de terreno.