



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN PILAS DE BIOLIXIVIACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

RODRIGO IGNACIO RODRÍGUEZ MERINO

PROFESOR GUÍA:

RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN

AÑO 2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Ingeniero Civil Mecánico
POR: Rodrigo Ignacio Rodríguez Merino
FECHA: 28 de Octubre del 2014
PROFESOR GUÍA: Ramón Frederick González

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN PILAS DE BIOLIXIVIACIÓN

La Biolixiviación de cobre en pilas es un método utilizado actualmente por la industria, siendo de gran interés para minerales sulfurados. La rentabilidad de este proceso depende de diversos factores, especialmente de la temperatura de operación de la pila, ya que los microorganismos utilizados son muy sensibles a su variación teniendo un rango óptimo de operación, en el cual su eficiencia se ve mejorada aumentando la velocidad de extracción del cobre.

El objetivo de este trabajo es el estudio del comportamiento térmico de una pila de biolixiviación a través de un modelo físico-matemático y simulaciones termo-fluidodinámicas que consideren tanto los efectos ambientales, como la generación de calor al interior de la pila.

Se presenta un modelo matemático que considera el estado multifásico del sistema, donde coexisten la fase sólida del material apilado, la líquida del fluido de irrigación y la gaseosa de la aireación, describiendo las principales ecuaciones que intervienen tanto en el transporte de momentum y de energía en medios porosos.

Se realizan simulaciones en el software COMSOL Multiphysics para un sistema simplificado que considera un medio saturado en fluido cuyo campo de velocidad es descrito con la Ley de Darcy, además de la transferencia de calor considerando los términos de fuente y los fenómenos de borde.

Se observa que la generación de calor volumétrica es el principal factor para mantener altas temperaturas en la pila.

La convección interna debido al fluido de irrigación también tiene importancia en la temperatura alcanzada por el medio, al aumentar al doble la tasa de irrigación disminuye la temperatura promedio entre 7,5 [K] y 10,5 [K].

Cubrir la pila atenúa los fenómenos de contorno disminuyendo la evaporación, logrando un aumento en la temperatura promedio de 3,5 [K] en verano y de 5,75 [K] en invierno, lo cual es un aporte moderado.

Aumentar la temperatura del fluido de irrigación en 10 [K] presenta un aumento entre 1,5 [K] a 2 [K] en la temperatura promedio de la pila, siendo un aporte despreciable con respecto a los costos que puede involucrar el aumento de la temperatura de irrigación.

Para
mi madre y padre
siempre
allí antes y aquí
para ellos

AGRADECIMIENTOS

Al cruzar esta meta lo primero que veo es a mi familia, con sus brazos abiertos eterna e incondicionalmente. A mi madre cuya voz me ha reconfortado cada día de estos 24 años, quien a pesar del esfuerzo de sus 500 horas semanales siempre ha estado presente, el cordón de la vida que jamás se romperá. A mi padre, con sus manos moldeadas por el trabajo, hacedor del ejemplo y el ingenio, los juegos y la enseñanza, la perseverancia y la superación, parte de las cosas que le debo. Mis hermanas, Romina y Lucía, la risa, la alegría, la luz, el calor y los colores son ustedes, mis cómplices, mis amigas eternas. Mis tíos, tías, primos y primas, por su compañía y aprecio.

A ti que llevas tanto tiempo acompañándome, de cerca y de lejos, en los momentos más bellos y más tristes, has sido como la música en toda su extensión y variedad, le has dado el ritmo a mis pasos.

Cuantos momentos e historias se han acumulado estos años de U, amigos y amigas con quienes he compartido cientos de días y noches, disfrutando, riendo, cantando, conversando interminablemente, bailando, terraceando, yendo y viniendo sin tener que dejar por los embases, “semanas perfect”, “pa’ la pachamama”, “vamos pa’ geo”, “a la lateral”, “con lluvia igual pascual”, “el viernes en Juan Gómez, en Medi, en Ondonto,..”. Mary Poly, Tomás, Jaime, Ramiro, Carlo, Lizzy, Pampero, Maripangui, les agradezco estos años, su gran amistad, y deseo que esto recién comience.

A Demolición y a Carlitos, el guía espiritual, a los Tecito Frío, a todos los amigos y amigas de mecánica, donde conocí gente realmente valiosa. Al luchito, compañero de mochileo y de grandes momentos. A la comunidad de la U, desde donde me llevo la gran responsabilidad social que toda persona debiese tener, el compañerismo, la lucha y la esperanza de un futuro más humano.

Agradezco a mi profesora Cynthia Acuña, quien en cierta forma me dio la voz y las palabras, sin su carisma y pasión no sería el mismo.

Por último, agradezco a mi profesor guía, Ramón Frederick, quien durante esta memoria siempre estuvo dispuesto a ayudarme, corregirme y enseñarme. A los funcionarios del Dimec, por su labor y disposición.

A todos, un abrazo enorme!

Y que empiece el mambo!

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes Generales:	1
1.1.1 Minería del cobre en Chile:	1
1.1.2 La hidrometalurgia del Cobre:.....	2
1.1.3 Biolixiviación:	5
1.2 Motivación:	8
1.3 Objetivos:	12
Objetivo General:	12
Objetivos Específicos:.....	12
1.4 Alcances:.....	12
2. ANTECEDENTES	13
2.1 Modelo Físico-Matemático:.....	13
2.2 Descripción del Modelo Físico:	13
2.3 Descripción del Modelo Matemático:	15
2.3.1 Consideraciones del Modelo Matemático:	15
2.3.2 Ecuaciones de Flujo Multifásico:.....	16
2.3.3 Ecuación de la Energía:.....	21
2.3.4 Condiciones Iniciales y de Borde:.....	23
2.4 Mecánica de Fluidos Computacional:	26
2.4.1 Medios Porosos y Sistemas Multifásicos:	26
2.4.2 Módulo – Ley de Darcy:.....	27
2.4.3 Módulo – Transferencia de calor en medio poroso:	28
2.4.4 Módulo – Transporte de especies diluidas:.....	29
3. METODOLOGÍA	30
3.1 Metodología General:	30
3.1.1 Recopilación de Antecedentes:	30
3.1.2 Determinación del Modelo Físico-Matemático:	30
3.1.3 Simulación Termo-fluidodinámica:	31
3.1.4 Análisis y Discusión de Resultados:	32
3.2 Metodología Específica:.....	33
3.2.1 Geometría de la Pila:	33

3.2.2	Mallado:.....	33
3.2.3	Características principales de las simulaciones:.....	35
3.2.4	Definición de los casos de estudio:.....	41
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE CASOS.....	59
4.1	Ley de Darcy:	60
4.2	Transferencia de Calor:	66
4.2.1	Caso 1 - Contraste para diferentes generaciones de calor:	66
4.2.2	Caso 2 - Efectos del tamaño de la pila:.....	82
4.2.3	Caso 3 - Efecto de la tasa de Irrigación:	86
4.2.4	Caso 4 - Efecto del aumento en la temperatura del fluido de irrigación:.....	93
4.2.5	Caso 5 - Efectos de las condiciones ambientales:	103
4.2.6	Caso 6 - Efecto de la concentración de oxígeno:	111
5.	CONCLUSIONES.....	126
5.1	Conclusiones sobre el modelo matemático:.....	126
5.2	Conclusiones sobre las simulaciones termo-fluidodinámicas:.....	127
5.3	Recomendaciones:.....	131
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	132
7.	ANEXOS	135

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales:

1.1.1 Minería del cobre en Chile:

Chile es el principal productor mundial de cobre, teniendo una participación del 31,8 % de la producción mundial con 5.433.900 [TM en cobre fino] el año 2012, seguido por China que tuvo un 9,4 % de la producción mundial el mismo año. De este total se produjeron 2.028.800 [TM en cobre fino] a través de la hidrometalurgia con el proceso de extracción por solvente y electroobtención (SX-EW), lo cual representa un 57,6% de la producción mundial a través de este proceso [1], posicionando a Chile como líder mundial en la materia.

Actualmente se presentan positivas perspectivas a largo plazo dados los procesos de urbanización de China e India que son los 2 principales países demandantes del metal rojo. Además, se han observado altos precios del cobre, desde el 2004, lo que ha fomentado el estudio y desarrollo de muchos proyectos de baja ley haciéndolos rentables [2].

El cobre se extrae por 2 vías generales: la pirometalurgia y la hidrometalurgia. La primera trata los sulfuros de cobre a través del chancado y molienda, luego un proceso de flotación, para pasar a la fundición y electrorefinación. Mientras que la hidrometalurgia trata principalmente los óxidos de cobre, que se encuentran más cercanos a la superficie, donde el mineral pasa por una etapa de lixiviación, extracción por solvente y electroobtención obteniéndose cátodos de cobre de alta pureza.

Los sulfuros de cobre también pueden ser tratados con la hidrometalurgia, pero en este proceso se tiene una muy lenta disolución, por lo que se requiere un catalizador de la reacción, lo que ha fomentado el estudio e implementación de la biotecnología utilizando bacterias para la extracción del cobre, en un proceso llamado Biolixiviación [3].

1.1.2 La hidrometalurgia del Cobre:

El nombre de Hidrometalurgia se refiere al empleo generalizado de soluciones acuosas como agente de disolución. Como se mencionó, el mineral, generalmente como óxido de cobre, pasa por un proceso de lixiviación, extracción por solvente (SX, *Solvent Extraction*) y electroobtención (EW, *ElectroWinning*).

La lixiviación es el proceso con el cual puede disolverse el cobre del mineral aplicando una solución de ácido sulfúrico y agua. Existen diversos métodos para realizar la lixiviación, los cuales se presentan a continuación [4].

Lixiviación in situ: Se refiere a la aplicación del disolvente directamente sobre un cuerpo mineralizado sin pasar por la etapa de extracción de este mineral. El mineral se fractura y se inyecta la solución en el lugar. Esto permite menores costos, pero tiene una baja recuperación.

Lixiviación de Botadero: Consiste en lixiviar lastres de minas de tajo abierto los cuales poseen muy baja ley (<0,4% de Cu) para ser lixiviados por otros métodos. El mineral, generalmente de tamaño *run of mine* (ROM), es acopiado en una superficie poco permeable y la solución disolvente es regada en su superficie.

Lixiviación en pilas: Es una de las más utilizadas por la industria. El mineral extraído se prepara a través del chancado y aglomeración con el fin de lograr una buena permeabilidad, luego se apila en canchas que han sido previamente preparadas impermeabilizando el suelo que debe contar con una leve pendiente para recolectar la solución que es irrigada al lecho.

Lixiviación en bateas o percolación: Consiste en contactar un lecho mineral con la solución acuosa que percola e inunda una batea o estanque. El estanque cuenta con un fondo falso permeable que permite la recolección de la solución.

Lixiviación por agitación: El mineral chancado es llevado a unos agitadores mecánicos para mantener la pulpa en suspensión hasta la disolución completa. Se utiliza para minerales de alta ley y dura alrededor de unas horas.

El siguiente cuadro muestra una comparación entre los distintos tipos presentados.

Tabla 1.1.1: Cuadro comparativo para tipos de lixiviación [8]

Rangos de Aplicación y resultados	Métodos de Lixiviación			
	En Botaderos	En Pilas	Percolación	Agitación
Ley del mineral	Baja ley	Baja-media	Media-alta	Alta ley
Tonelaje	grande	Gran a mediano	Amplio rango	Amplio rango
Inversión	minima	media	Media a alta	alta
Granulometría	Corrido de mina	Chancado grueso	Chancado medio	Molienda húmeda
Recuperaciones típicas	40 a 50 %	50 a 70%	70 a 80%	80 a 90 %
Tiempo de tratamiento	Varios años	Varias semanas	Varios días	horas
Calidad de soluciones	Diluidas (1-2 gpl Cu)	Diluidas (1-6 gpl Cu)	Concentradas (20-40 gpl Cu)	Medianas (5-15 gpl Cu)
Problemas principales en su aplicación	-recuperación incompleta, -reprecipitación de Fe y Cu, -canalizaciones, -evaporación - pérdidas de soluciones - soluciones muy diluidas.	-recuperación incompleta, -requiere de grandes áreas, - canalizaciones, - reprecipitaciones, - evaporación.	- bloqueo por finos, - requiere de más inversión, - manejo de materiales, -necesidad de mayor control en la planta.	- molienda, - lavado en contracorriente, - tranque de relaves, - inversión muy alta, - control de la planta es más sofisticado.

En este trabajo se considera la lixiviación en pilas, proceso que se muestra en la Figura 1.1-1 y que será explicado en más detalle a continuación.

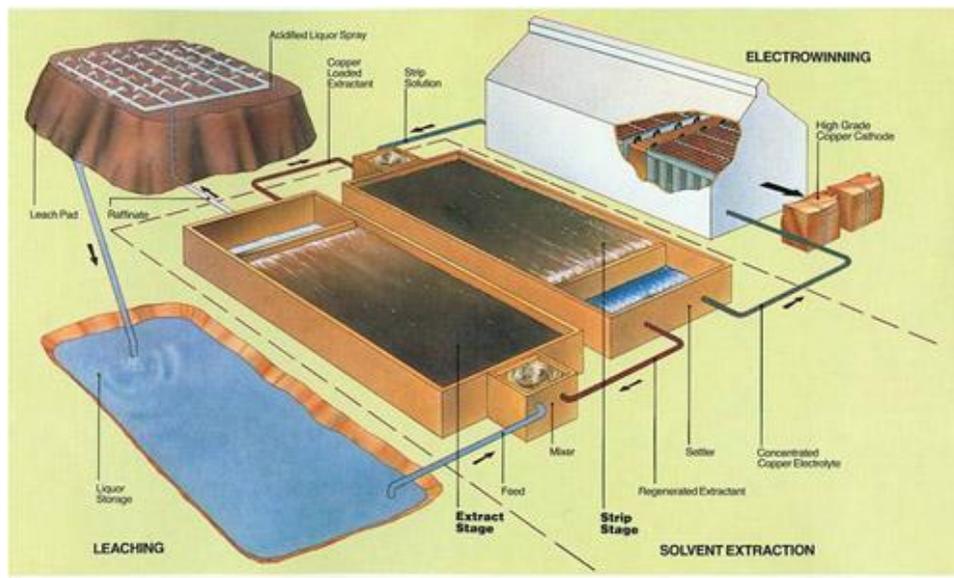


Figura 1.1-1: Esquema de la planta de extracción por solventes, faena Radomiro Tomic. [6]

- Chancado y Aglomeración [5]:

El mineral extraído es triturado en varias etapas de chancado (2 o 3 etapas) para obtener un tamaño máximo de 1,5 a $\frac{3}{4}$ de pulgada, esto se realiza para liberar la especie de interés y dejarla expuesta a la infiltración de la solución ácida.

Luego se realiza la aglomeración, cuyo fin es preparar el material para la lixiviación, logrando un buen coeficiente de permeabilidad. El material es curado con una mezcla de agua y ácido sulfúrico iniciando ya el proceso de sulfatación del cobre y haciendo que los finos (granulometría inferior a 0,1- 0,15 [mm]) se adhieran a los gruesos (granulometría menor a 38 [mm]) evitando así que las partículas de menor tamaño segreguen y formen áreas ciegas que disminuyen la percolación, aumentando el tiempo de lixiviación y el consumo de reactivos.

El material preparado es llevado a las canchas de lixiviación.

- Preparación de pilas y Lixiviación [5]:

El material es depositado en las canchas de lixiviación, las cuales son amplias superficies de terreno con una inclinación menor al 10%. Al depositarlo se forman las pilas de lixiviación las cuales tienen una sección trapezoidal, generalmente con altura de entre 3 y 8 metros, además poseen una inclinación lateral, para el drenaje, y una en el sentido longitudinal, para la evacuación de las soluciones.

El suelo de las canchas es cubierto por membranas de plástico, como el polietileno de alta densidad (HDPE), para protegerlo de la contaminación, además se instalan membranas impermeables (geomembranas de origen sintético) que permiten interceptar las soluciones y llevarlas a las canaletas de recolección. Sobre las membranas se instalan cañerías perforadas de drenaje y una cubierta de grava drenante. Las canaletas de recolección se encuentran al costado de cada pila para transportar las soluciones por gravedad.

Sobre la pila se instala una malla de riego que se extiende por toda la superficie, este sistema distribuye la solución lixivante por medio de goteros, que incluso pueden estar bajo la superficie de la pila cuando las condiciones climáticas lo requieren, o por medio de aspersores dependiendo la evaporación o la disponibilidad de agua en el proceso.

Las pilas pueden ser del tipo dinámicas o estáticas, en la primera el material es transportado a botaderos luego de realizar la lixiviación con el fin de reutilizar las canchas, mientras que en la segunda la pila ya lixiviada forma la base de una nueva pila, lo cual se realiza un par de veces quedando luego como botadero.

Para producir la extracción del cobre, la pila debe ser regada por una solución de ácido sulfúrico y agua, generando diversas reacciones en su interior. Con este proceso se obtienen soluciones de sulfato de cobre (CuSO_4) con concentraciones de hasta 9 gramos por litro (gpl) denominada PLS (*pregnant leach solution*, o solución de lixiviación impregnada), que es recogida en la base de la pila y transportada en las canaletas de recolección a unas piscinas donde se limpian eliminando las partículas sólidas que

podieron haber sido arrastradas. El PLS pasa a la siguiente etapa: Extracción por Solvente (SX).

- Extracción por Solvente (SX) [6]:

En la etapa de SX el PLS se libera de impurezas mediante una extracción iónica, llegando a una concentración de 45 [gpl]. Para realizarlo se mezcla con una solución de parafina y resina orgánica, la resina captura los iones de cobre de forma selectiva generándose un complejo resina-cobre y una solución empobrecida en cobre que se llama Refino, el cual es recirculado al proceso de lixiviación para ser regado sobre la pila. Finalmente el compuesto de resina-cobre es tratado con una solución electrolito rica en ácido, el que origina la descarga de cobre desde la resina hacia el electrolito, mejorando la concentración de cobre. Esta es la solución que se lleva hasta la planta de Electroobtención (EW).

- Electroobtención (EW) [7]:

La última etapa, EW, corresponde a un proceso electrometalúrgico donde se recupera el cobre desde la solución electrolito para producir cátodos de cobre de alta pureza (99,99 %). Para realizarlo la solución es llevada a las celdas de electroobtención, que son unos estanques rectangulares donde hay una serie de ánodos de plomo y cátodos de acero inoxidable, luego se hace pasar una corriente eléctrica continua de baja intensidad que entra por los ánodos y sale por los cátodos, dado que en la solución electrolito el cobre está cargado positivamente (Cu^{+2}) es atraído por el polo negativo (cátodos), depositándose en ellos por un tiempo de 6 a 7 días luego de los cuales se tienen cátodos con cobre por ambas caras con espesor de 3 a 4 [cm] y una alta pureza.

Finalmente se produce la cosecha de cátodos, se despegan las planchas de cobre depositadas en estos y se apilan para su comercialización.

1.1.3 Biolixiviación:

La lixiviación de los sulfuros de cobre es posible, en condiciones ambientales, utilizando una solución ácida y el oxígeno del aire, el cual es un agente oxidativo de gran potencial, pero la velocidad de esta reacción en condiciones abióticas es muy lenta para ser de interés comercial.

La velocidad de la lixiviación puede ser fuertemente mejorada utilizando microorganismos lixiviantes que son autótrofos, capaces de sintetizar todas las sustancias esenciales para su metabolismo a partir de sustancias inorgánicas, aeróbicos, que requieren oxígeno para respirar, y quimiosintéticos, que obtienen la energía necesaria para su metabolismo a partir de reacciones de oxidación de compuestos orgánicos reducidos, esto los hace capaces de oxidar minerales para producir el ion férrico y ácido sulfúrico necesario para la biolixiviación [3].

Cabe mencionar que por este medio se pueden tratar minerales recién extraídos de la mina y mineral chancado, minerales de ley intermedia, sulfuros secundarios y primarios. Siendo la biolixiviación en pila desde sulfuros secundarios, como la calcocita (Cu_2S) y la covelina (CuS), ampliamente practicada en el mundo.

La siguiente tabla muestra las principales bacterias utilizadas, además del rango de temperatura y acidez en la que operan, así como los substratos que utilizan.

Tabla 1.1.2: Características de los principales microorganismos utilizados [9]

Microorganismos	Temperatura [°C]	pH	Substrato					Fuente de carbono	
			Fe^{+2}	S^0	FeS_2	CuFeS_2	S_4O_6	CO_2	Levadura
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	10-30	1.4-3.5	+	+	+	+	+	+	-
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	10-40	1.3-4.5	-	+	-/+	-/+	+	+	-
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	10-35	1.3-3.5	+	-	+	-/+	-	+	-
<i>S. thermosulfoxidans</i>	40-50		+	+	+	+	-	+	+
<i>Sulfolobus BC</i>	70-90	1.6-2.5	+	+	+	+	+	+	+

Nota: + Significa que la reacción puede darse en estas condiciones.

- Significa que las reacciones son inusuales en estas condiciones.

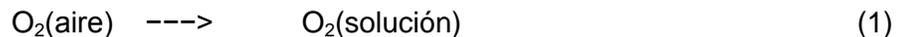
Estas bacterias se pueden reproducir de forma natural en las pilas, creciendo unas u otras dependiendo las condiciones a las que se encuentren, también es posible controlar su reproducción en laboratorios llevándola a las pilas a través de la solución lixivante.

Uno de estos microorganismos ha presentado especial atención: *Acidithiobacillus ferrooxidans*. El cual fue el primero en ser aislado en 1947 desde un drenaje ácido de minas de carbón, comenzando el estudio y las posibilidades de controlar la Biolixiviación. Su función principal es acelerar la conversión del ion ferroso (Fe^{2+}) a ion férrico (Fe^{3+}) quien lixivia químicamente a los sulfuros presentes.

1.1.3.1 Reacción en Biolixiviación:

El proceso de extracción realiza el siguiente ciclo de reacciones [9]:

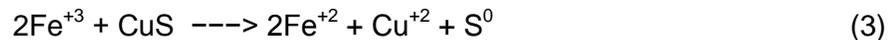
- EL oxígeno debe disolverse en la solución lixivante:



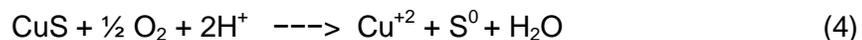
- El oxígeno en solución oxida al ión ferroso disuelto, proceso acelerado por la presencia de Bacterias:



- El ión férrico lixivia químicamente a los sulfuros de cobre presentes, que se pueden tipificar aquí en el CuS (Covelina), de acuerdo a la reacción:



De estas reacciones se ve que el hierro es un portador de carga intermedio que es continuamente oxidado y reducido, de modo que la **reacción global neta** es:



Muchos microorganismos también catalizan la oxidación bacteriana del azufre residual producido en la lixiviación de los sulfuros de cobre (reacción 3), según la reacción:



1.1.3.2 Factores influyentes en la Biolixiviación:

El rendimiento de la biolixiviación se ve influenciado por diversos factores los cuales afectan el desarrollo de las bacterias, estos factores son del tipo ambiental, biológico y fisicoquímicos. Entre estos factores se consideran [3]:

- PH: Las bacterias requieren un medio ácido para desarrollarse, generalmente menor a 3.
- Oxígeno y Dióxido de Carbono: El oxígeno es utilizado como oxidante por las bacterias en ambientes de lixiviación, mientras que el dióxido de carbono es utilizado como fuente de carbono para su arquitectura celular. Por esta razón se hace indispensable lograr una buena aireación con adecuados niveles de O_2 y CO_2 , lo cual se logra inyectando aire desde la base de la pila.
- Nutrientes: Son requeridos para su óptimo desarrollo, estos pueden ser obtenidos desde el mineral como amonio, fosfato, azufre, iones metálicos, entre otros.
- Fuente de Energía: Los microorganismos utilizan como fuente primaria de energía el ión ferroso (Fe^{+2}), el cual se produce de forma biológica en la lixiviación, y el azufre inorgánico.
- Luz: La luz visible y la no filtrada produce un efecto inhibitorio sobre algunas bacterias, aunque el hierro produce alguna defensa sobre la luz visible.
- Temperatura: Los microorganismos se clasifican según el rango de temperatura en el que pueden sobrevivir. Los mesófilos tienen un rango óptimo entre 30-40°C, los moderadamente termófilos cercano a los 50°C, y los extremadamente termófilos sobre los 65°C. Si la temperatura es menor a los 5°C se vuelven inactivas, mientras que si sobrepasa su rango de operación se mueren.

Es necesario considerar que la reacción de oxidación de los minerales sulfurados es exotérmica, por lo cual se produce un autocalentamiento.

- Presencia de inhibidores: En la biolixiviación se van acumulando metales pesados como zinc, arsénico y hierro, los cuales en ciertas concentraciones resultan tóxicos para las bacterias. Esto se puede disminuir diluyendo la solución lixivante.
- Tamaño de la partícula: El tamaño de la partícula y la porosidad de la pila de biolixiviación son muy importantes para asegurar el buen escurrimiento del ácido y permitir un área de contacto adecuada con los microorganismos.

Con los criterios actuales de operación, es posible extraer entre el 75% y 95% del cobre contenido en tiempos que van desde los 6 a los 12 meses, sin embargo muchas de las plantas operan bajo la eficiencia estimada en el diseño por la dificultad de controlar los aspectos antes mencionados [9].

1.2 Motivación:

En la actualidad la minería en Chile es un sector en crecimiento donde el año 2013 alcanzó una producción record de 5,77 millones de toneladas métricas finas de cobre,

mientras que para el 2014 la Sociedad Nacional de la Minería (Sonami) proyecta un crecimiento del 5%, llegando a superar las 6 millones de toneladas métricas de cobre fino, además se espera que su precio este entre US\$ 3 y US\$ 3,2 por libra.

El sector muestra algo de confianza en que la economía mundial mejore, que Europa salga de la recesión, Estados Unidos revitalice su economía y China crezca alrededor del 7,5 %, sumado a los nuevos proyectos que comenzarán su operación, se podría augurar un buen futuro para la minería del cobre.

A pesar de lo anterior los costos de operación fueron más altos en el 2013 que en el 2012 y hay opiniones como la de Diego Hernández, presidente ejecutivo de Antofagasta Minerals, que ve con incertidumbre la posibilidad de este salto en la producción, considerando que el sector está en la encrucijada de crecer en producción o estancarse, dilema que debe resolverse al enfrentar los desafíos de la minería, como lo son el suministro de energía y agua a precios competitivos, aumentar la productividad de las empresas y crecer de una forma sustentable e inclusiva que permita tomar acuerdos entre los distintos actores del sector como las autoridades y las ONG. (Entrevista, La Tercera, 23 de marzo del 2014)

Es necesario fomentar los procesos de extracción que logren cumplir los cada vez más estrictos estándares medio ambientales, siendo la hidrometalurgia el proceso más limpio para la extracción del cobre se hace fundamental buscar las formas de implementarla para distintos tipos de minerales, en este sentido la Biolixiviación presenta grandes ventajas, por lo cual ha concentrado estudios a escala de laboratorios y pilas experimentales.

Por otro lado, se ha estudiado que durante los próximos años disminuirá la ley del cobre soluble por ácido, mientras que la ley del cobre total se mantendrá (como lo muestra la Figura 1.2-1: Leyes de cobre total y soluble de la minería entre 2011-2026 [11]), esto se debe a la mayor presencia de sulfuros primarios de cobre, como la calcopirita (CuFeS_2).

Lo anterior se debe a la estructura de los yacimientos donde en primer lugar se tienen los óxidos de cobre, altamente explotados por estar cercanos a la superficie, luego viene una franja de sulfuros secundarios como la Covelina (CuS), para finalmente llegar a los sulfuros primarios que se encuentran en grandes cantidades.

La Biolixiviación lograría mantener o incluso aumentar la producción al proveer un método para lixiviar este material.

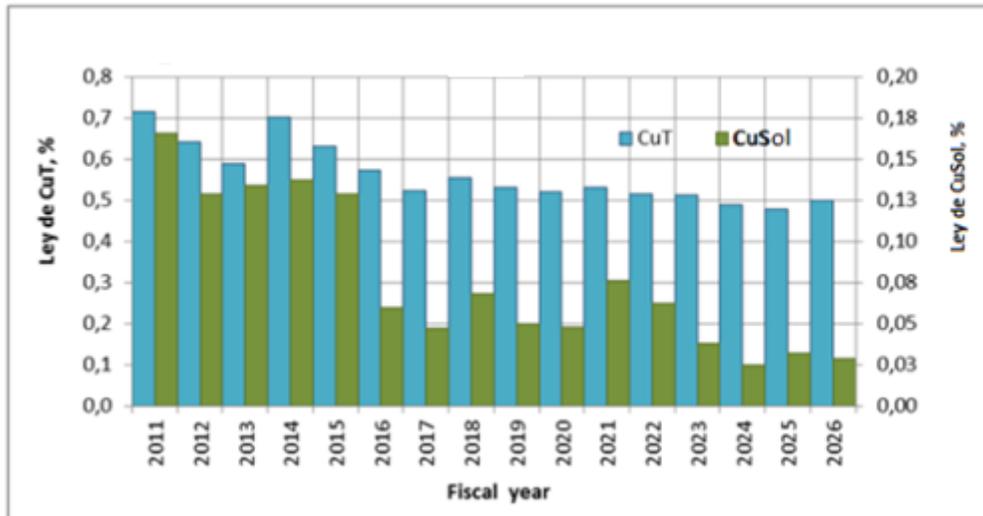


Figura 1.2-1: Leyes de cobre total y soluble de la minería entre 2011-2026 [11]

Se debe considerar que para lograr un buen rendimiento de la Biolixiviación es necesario conocer y controlar la temperatura a la que se encuentra la pila, siendo uno de los factores más influyentes en la eficiencia de las bacterias. Por ejemplo, *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans* crecen de manera óptima a 20 – 25 °C y se sabe que su actividad puede decaer hasta un 50% por cada 7 °C de caída de la temperatura [9].

En la Figura 1.2-2: Dependencia en la tasa de crecimiento de microorganismos según su temperatura [12] se observa lo antes mencionado, graficando la actividad de los microorganismos Mesófilos, Termófilos Moderados y Termófilos Extremos según la temperatura a la que se encuentran.

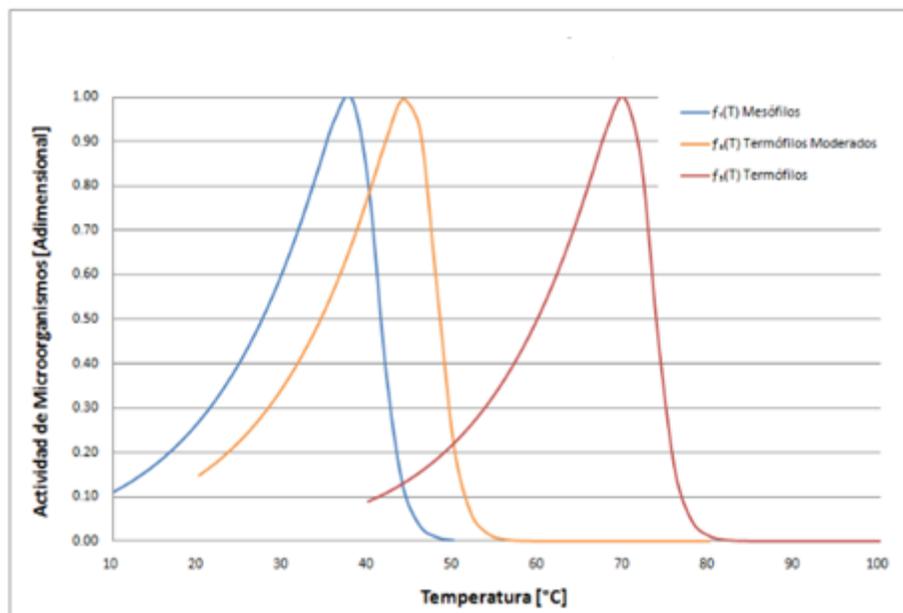


Figura 1.2-2: Dependencia en la tasa de crecimiento de microorganismos según su temperatura [12]

Además se ha estudiado que al aumentar la temperatura de la solución de riego en botaderos aumenta la extracción de cobre, lo cual hace muy interesante el análisis de la transferencia de calor en las pilas de biolixiviación, específicamente cuando se aumenta la temperatura de la solución de riego [10]

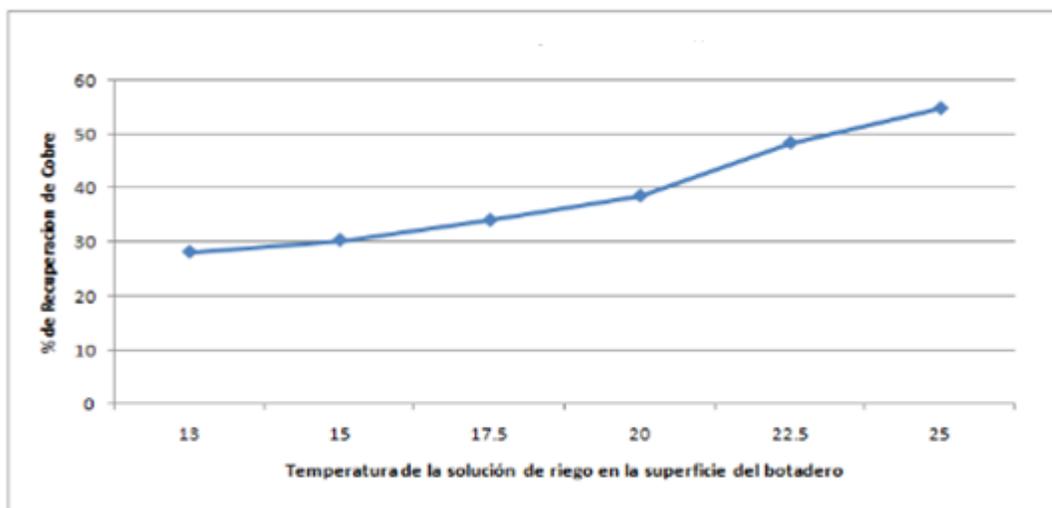


Figura 1.2-3: Porcentaje de recuperación de cobre v/s Temperatura de la solución de riego en botadero [13]

Finalmente, dada la fuerte dependencia de las bacterias a la temperatura del medio en que se encuentran, en los últimos años se han realizado esfuerzos por lograr una mejor comprensión de los fenómenos involucrados en la transferencia de calor de pilas de Biolixiviación, para esto es fundamental contar con modelos matemáticos confiables que permitan conocer cómo se comportará el sistema optimizando tiempo y dinero.

1.3 Objetivos:

Objetivo General:

- Estudiar el comportamiento térmico de una pila de Biolixiviación a través de un modelo físico-matemático y simulaciones termo-fluidodinámicas.

Objetivos Específicos:

- Definir un modelo físico-matemático que represente las condiciones de operación de una pila de Biolixiviación.
- Realizar una simulación termo-fluidodinámica, utilizando COMSOL Multiphysics, para obtener perfiles de temperatura al interior de la pila.
- Verificar la consistencia de los resultados con el criterio de realismo físico y orden de magnitud de estos.

1.4 Alcances:

- El modelo físico-matemático considera el estado multifásico del sistema, de las 3 fases presentes, con ecuaciones para el flujo en medios porosos no saturados y la transferencia de calor.
- La simulación termo-fluidodinámica es una simplificación del modelo antes propuesto, considerando un sistema bifásico saturado en fluido de irrigación.
- Las principales características de la simulación son:
 - Estado transiente en 2 dimensiones (2 D).
 - Sistema bifásico: Material apilado y fluido de irrigación.
 - Campo de velocidad del fluido de irrigación en un medio saturado dado por la Ley de Darcy.
 - Efectos ambientales como la convección del viento, la radiación y la evaporación.
 - Generación de calor volumétrica en función de la temperatura del medio.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Modelo Físico-Matemático:

Se describirán las condiciones físicas en las que se encuentra una pila de Biolixiviación y se definirán las ecuaciones bases para lograr el modelamiento de los flujos en su interior y de la transferencia de calor.

2.2 Descripción del Modelo Físico:

Una pila de biolixiviación es un medio poroso en el que ocurren procesos complejos que involucran los siguientes fenómenos (Casas et al, 1998) [12]:

- a) Reacción de la especie mineral con ácido sulfúrico, ion férrico y oxígeno disuelto.
- b) Hidrolisis y precipitación de compuestos complejos en disolución, que implica principalmente especies de iones férricos.
- c) Transporte, adhesión, crecimiento y acción catalizadora de microorganismos.
- d) Transporte de especies acuosas dentro de la partícula mineral.
- e) Transporte de oxígeno y agua a través de la pila, con suministro de aire a la pila por convección natural o forzada y difusión.
- f) Calentamiento y enfriamiento de la pila, asociada a las reacciones exotérmicas y la transferencia de calor al medio ambiente.

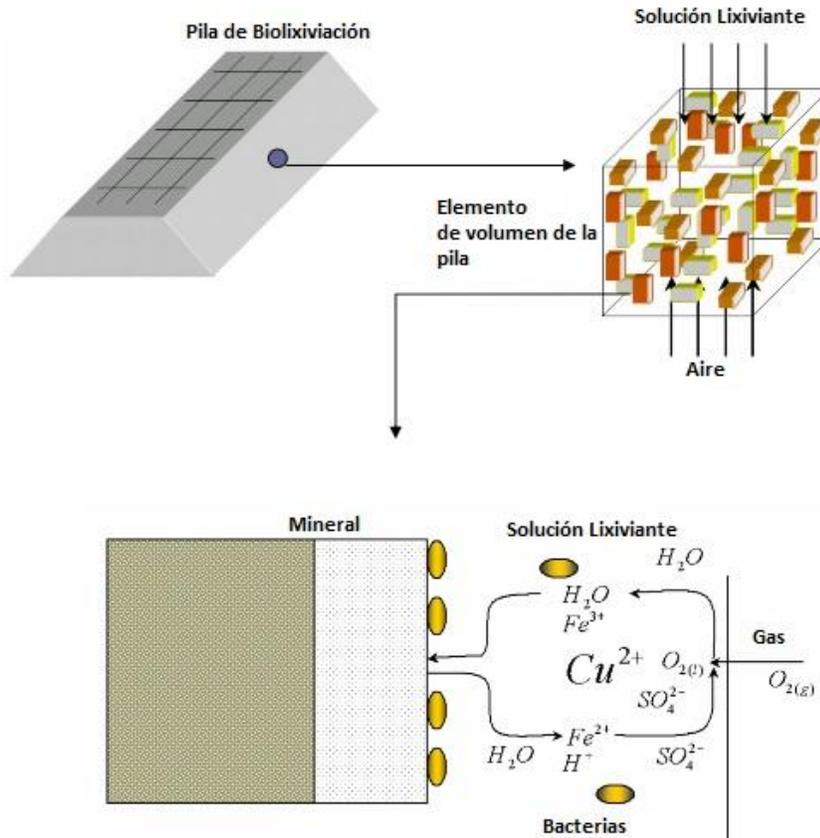


Figura 2.2-1: Fenómenos de transporte y reacciones químicas [24]

La figura anterior muestra un elemento de volumen de la pila de biolixiviación, en el cual se observa el ingreso de la solución lixiviante por la parte superior y del aire por la inferior, además de la reacción química que involucra las 3 fases presentes y la acción de las bacterias.

Para este modelo los fenómenos de interés son:

- Flujo descendente del fluido de irrigación.
- Flujo ascendente de aire.
- Generación de calor por reacciones químicas y biológicas.

Estos fenómenos de transporte se pueden observar en un corte 2D de la pila, como lo muestra la Figura 2.2-2: Pila y los efectos de transporte principales [14]

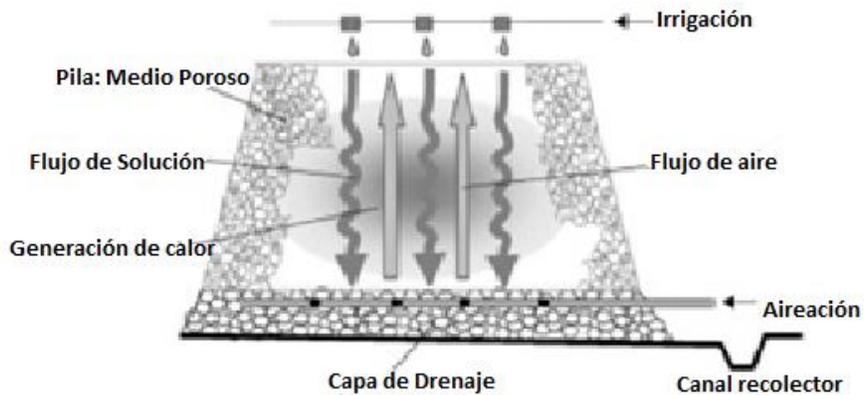


Figura 2.2-2: Pila y los efectos de transporte principales [14]

2.3 Descripción del Modelo Matemático:

Se han realizado diversos modelos para estudiar tanto los fenómenos de lixiviación como los de biolixiviación, estos modelos tienen diversas complejidades y abarcan distintos aspectos, en general estos modelos son isotérmicos. Dixon (2003) [25] realizó una comparación entre 15 de estos modelos en función de los aspectos que abarcan. La validación de los modelos se ha realizado para columnas experimentales de biolixiviación y muchos se han utilizado solo para estudios cuantitativos, dada la dificultad del proceso.

Para este caso podemos considerar el sistema como multifásico y multicomponente, donde el flujo bifásico en medio poroso es inmisible, con reacciones químicas y biológicas, no isotérmico pero con equilibrio termodinámico local entre sus fases.

2.3.1 Consideraciones del Modelo Matemático:

Como primeras consideraciones se pueden asumir los siguientes puntos:

- Flujo en plano vertical 2D
- Darcy generalizado en flujos multifásicos
- Flujo inmisible
- Flujo laminar
- Porosidad y permeabilidad constante de la pila

- Medio poroso no compresible, homogéneo e isotrópico
- En los poros existen 2 fases: Líquido y gas
- Sistema no isotérmico con generación de calor por reacciones químicas y biológicas
- Equilibrio termodinámico local entre las fases
- Efecto de transporte de soluto sobre flujo de fluidos es débil (Permite separar problema de flujo y transporte)

Estas mismas consideraciones han sido utilizadas por diversos autores, siendo las más importantes la utilización del modelo de Darcy generalizado (que se presenta a continuación), el equilibrio termodinámico local entre las fases ([16,17,18]) que permite utilizar una sola ecuación de la energía, la homogeneidad del medio y el flujo laminar ([16,19,20,21]) que es requerido por la Ley de Darcy, una discusión sobre este último punto se presenta en el capítulo 4.1 “Resultados - Ley de Darcy”.

2.3.2 Ecuaciones de Flujo Multifásico:

Las ecuaciones clásicas de flujo bifásico inmiscible en medios porosos han sido propuestas por Cariaga, Concha y Sepúlveda [15] para resolver simultáneamente el flujo de la fase líquida y gaseosa en pilas de lixiviación, esto bajo las consideraciones nombradas anteriormente, pero suponiendo un sistema isotérmico.

2.3.2.1 Ley de Darcy modificada:

Darcy, en 1856, estudió el movimiento de agua en medios porosos, llegando a una expresión matemática ampliamente utilizada y que aplica para diversos tipos de suelo bajo ciertas consideraciones.

Darcy encontró que el caudal que atravesaba un permeámetro era linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico. Obteniendo la siguiente expresión:

$$\vec{v}_s = -K \frac{dh}{dl} \quad (2.1)$$

Donde:

\vec{v}_s : Velocidad de Darcy o superficial [m/s]

K : Conductividad hidráulica [m/s]

$\frac{dh}{dl}$: Gradiente hidráulico [m/m]

. El gradiente hidráulico ($\frac{dh}{dt}$) se produce por la resistencia del medio al paso del fluido, por lo cual existen diferencias de presión a lo largo del trayecto que permiten un flujo en la dirección decreciente de dh , por esta razón el signo negativo.

La conductividad hidráulica (K) es una medida de la facilidad de fluir en el medio poroso, la cual depende tanto del medio como del fluido, según la siguiente expresión.

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (2.2)$$

Donde:

g : Gravedad [m/s^2]

k : Permeabilidad del medio [m^2]

μ : Viscosidad dinámica del fluido [$Pa \cdot s$]

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]

Además se sabe que:

$$\vec{v}_s = \phi \vec{v}_f \quad (2.3)$$

Donde:

ϕ : Porosidad del medio [m^3/m^3]

\vec{v}_f : Velocidad física del sistema [m/s]

La Ley de Darcy solo se puede aplicar si el medio está en condición de completa saturación de un solo fluido, por lo cual se han introducido modificaciones expandiendo el modelo de Darcy para flujos bifásicos, llegando a las expresiones que se detallan a continuación (2.4 - 2.7).

La Ley de Darcy modificada incluye la permeabilidad relativa a cada fase (k_{ri}), la cual toma valores entre 0 y 1, debido a que la presencia un fluido impide el movimiento del otro.

El problema consiste en determinar las presiones de ambas fases (p_L , p_g) y su saturación (s_L , s_g), para esto se consideran las ecuaciones de continuidad (2.4) para cada fase y la ley de Darcy modificada para flujos multifásicos (2.5).

$$\frac{\partial(\phi \rho_i s_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho_i \vec{v}_i) = q_i \quad (2.4)$$

$$\vec{v}_i = -\frac{k_{ri}}{\mu_i} k (\nabla p_i - \rho_i \vec{g}) \quad (2.5)$$

Además se debe considerar la discontinuidad de ambas fases (2.6) y que ambas fases llenan los espacios vacíos al interior del medio poroso (2.7).

$$p_c(s_L) = p_g - p_L \quad (2.6)$$

$$s_L + s_g = 1 \quad (2.7)$$

Dónde:

$i = L$: Representa la fase líquida

$i = g$: Representa la fase gaseosa

$\vec{g}=(0,g)$: Vector aceleración de gravedad [m/s^2]

k : Permeabilidad del medio [m^2]

k_{ri} : Permeabilidad relativa a la fase i . Adimensional.

p_i : Presión de la fase i [pa]

p_c : Presión de Capilaridad [pa]

q_i : Término fuente de la fase i [$kg/(m^3*s)$]

s_i : Saturación de la fase i [m^3/m^3]

\vec{v}_i : Velocidad volumétrica de la fase i [m/s]

μ_i : Viscosidad dinámica de la fase i [$Pa*s$]

ρ_i : Densidad de la fase i [kg/m^3]

\emptyset : Porosidad del medio [m^3/m^3]

Este modelo permite que una de las fases sea compresible, como el gas, pero es posible considerar que ρ_g es constante dado las bajas velocidades al interior del medio, incluso para el caso de aireación forzada, dado que bajo esta suposición no necesariamente se implica que $\vec{v}_g = 0$.

Cabe notar que el flujo no saturado de una fase en un medio poroso es un caso particular de las ecuaciones antes propuestas, al considerar p_g y s_g , iguales a 0, y corresponde a la solución de la Ecuación de Richard (2.8 – 2.10).

Definiendo el contenido de humedad como: $\theta = \phi * s$ [m^3/m^3], donde s es la saturación del fluido. La ecuación de Richards para una sola fase fluida con saturación variable queda:

$$\frac{\partial(\theta)}{\partial t} + \text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (2.8)$$

$$\vec{v} = -\frac{k_r}{\mu} k(\nabla p - \rho \vec{g}) \quad (2.9)$$

$$p_c(\theta) = -p \quad (2.10)$$

2.3.2.2 Expresiones para el estado no saturado:

Para cerrar el sistema de ecuaciones, de la 2.4 a la 2.7, en condiciones de no saturación se debe contar con expresiones para $p_c(s_L)$, $k_{rL}(s_L)$ y $k_{rg}(s_L)$.

Brooks y Corey (BC, 1964), además de Van Genuchten (VG, 1980) han definido y validado experimentalmente las expresiones para los parámetros mencionados.

Ambos modelos, BC y VG, utilizan la saturación efectiva, dada por:

$$s_e(s_L) = \frac{s_L - s_{rL}}{1 - s_{rL} - s_{rg}} \quad (2.11)$$

Dónde:

$s_e(s_L)$: Saturación efectiva [m^3/m^3]

s_{rL} : Saturación residual del Líquido [m^3/m^3]

s_{rg} : Saturación residual del gas, pero se ha supuesto que $s_{rg} = 0$ [m^3/m^3].

- Expresiones de Brooks y Corey (BC):

Define sus ecuaciones en función de: $p_d > 0$ y $0,2 < \lambda < 3$, Donde:

p_d Presión de entrada, y corresponde a la presión de capilaridad requerida para desplazar la fase líquida desde los poros de mayor tamaño.

λ : Es un índice que cuantifica la distribución del tamaño de poro. Un valor pequeño describe un material con un único tamaño de grano, mientras que un valor muy alto describe un tamaño altamente no uniforme.

$$p_c(s_L) = p_d s_e^{-1/\lambda} \quad (2.12)$$

$$k_{rL}(s_L) = s_e^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} \quad (2.13)$$

$$k_{rg}(s_L) = (1 - s_e)^2 \left(1 - s_e^{\frac{2+\lambda}{\lambda}}\right) \quad (2.14)$$

- Expresiones de Van Genuchten (VG):

Define sus ecuaciones en función de ε, γ , $0 < m < 1$, $n = \frac{1}{1-m}$ y $\alpha > 0$. Donde, generalmente, $\varepsilon = \frac{1}{2}$, $\gamma = 1/3$, los cuales describen la conectividad de los poros.

$$p_c(s_L) = \frac{1}{\alpha} (s_e^{-\frac{1}{m}} - 1)^{1/n} \quad (2.15)$$

$$k_{rL}(s_L) = s_e^\varepsilon \left(1 - \left(1 - s_e^{\frac{1}{n}}\right)^m\right)^2 \quad (2.16)$$

$$k_{rg}(s_L) = (1 - s_e)^\gamma \left(1 - s_e^{\frac{1}{m}}\right)^{2m} \quad (2.17)$$

Disponiendo de datos para cualquiera de las expresiones anteriores es posible conocer el campo de presiones y la saturación de las fases, con lo cual se puede conocer la velocidad de cada fluido al interior de la pila.

- Correspondencia entre parámetros de BC y VG:

Finalmente se puede establecer una correspondencia entre los parámetros de BC y VG con las ecuaciones siguientes (Lenhard, 1989) [26]:

$$\lambda(m) = \frac{m}{1-m} \left(1 - 2^{-\frac{1}{m}}\right) \quad (2.18)$$

$$\overline{S}_x(m) = 0,72 - 0,35 e^{-(1-m)^{-4}} \quad (2.19)$$

$$p_d(m, \alpha) = \frac{\overline{S}_x^{\lambda-1}(m)}{\alpha} (\overline{S}_x^{-1/m}(m) - 1)^{1-m} \quad (2.20)$$

Donde:

\overline{S}_x : Saturación de ajuste. Parámetro de entrada para $p_d(m, \alpha)$.

Por lo tanto, dados los parámetros VG: m y α , es posible determinar el valor de los parámetros BC: λ y p_d , o viceversa.

2.3.3 Ecuación de la Energía:

La ecuación de la energía en medios porosos con generación por reacciones químicas y biológicas ha sido considerada de diversas formas, especialmente para estudiar los fenómenos de auto-calentamiento y combustión espontánea en pilas de compost [16, 17], también se han considerado modelos para la biolixiviación de calcocita desacoplándolos del flujo de las fases fluidas en el medio y para pilas de tamaños muy menores a las pilas de escala industrial [18, 19, 20, 21].

La ecuación que se presenta a continuación considera los términos conductivos y convectivos de las fases correspondientes, además un término de pérdida de calor por evaporación y el término fuente que corresponde a la generación de energía por reacciones químicas y biológicas, todo bajo la suposición de equilibrio térmico local entre las fases, la que permite tener una sola ecuación de la energía, en caso contrario se debería considerar una ecuación para cada fase por separado.

$$\langle \text{Acumulación} \rangle = \langle \text{Conducción} \rangle + \langle \text{Convección} \rangle + \langle \text{Cambio de fase} \rangle + \langle \text{Reacciones} \rangle$$

$$(\rho C_{p,T})_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = K_{eff} \nabla^2 T - \varepsilon_g \rho_g C_{p,g} v_g \nabla T + \varepsilon_L \rho_L C_{p,L} v_L \nabla T - L_v s_v + Q(T) \quad (2.21)$$

$$(\rho C_{p,T})_{eff} = \sum_{i=L,g,S} \varepsilon_i \rho_i C_{p,i} \quad (2.22)$$

$$K_{eff} = \sum_{i=L,g,S} \varepsilon_i \lambda_i \quad (2.23)$$

Dónde:

$C_{p,i}$: Calor específico de la fase i [J/(kg*K)]

L_v : Entalpia de vaporización [J/Kg]

$Q(T)$: Término fuente en función de la Temperatura [W/m³]

s_v : Masa de agua volumétrica transferida en evaporación o condensación [Kg/(m³ *s)]

v_g : Velocidad de la fase gaseosa [m/s]

v_L : Velocidad de la fase líquida [m/s]

ε_i : Fracción volumétrica en el poro de la fase i [m³/m³]

λ_i : Conductividad térmica de la fase i [W/(m*K)]

ρ_i : Densidad de la fase i [kg/m³]

Sub índice “*eff*” denota las propiedades efectivas.

Es de gran importancia considerar el término fuente (Q) ya que representa las reacciones químicas y biológicas en el sistema, reacciones que son en gran parte exotérmicas y contribuirán a aumentar la temperatura del medio, notar que este término no es una constante sino una función de la temperatura, entre otros factores.

Zambra [2] ha propuesto las siguientes ecuaciones:

$$Q(T) = G_{Reacciones} + G_{Bacterias} \quad (2.24)$$

$$G_{reacciones} = Q_m \varepsilon_s A_m \rho_s C_{ox} e^{\left(\frac{-E_m}{RT}\right)} \quad (2.25)$$

$$G_{Bacterias} = Q_b \varepsilon_s \rho_b F_{ox} \frac{A_1 e^{\left(\frac{-E_1}{RT}\right)}}{1 + A_2 e^{\left(\frac{-E_2}{RT}\right)}} \quad (2.26)$$

$$F_{ox} = \frac{C_{ox}}{C_{ox,0}} \quad (2.27)$$

Donde:

A_1 : Factor Pre-Exponencial para la activación de las bacterias [1/s]

A_2 : Factor Pre-Exponencial para la inhibición de las bacterias

A_m : Factor Pre-Exponencial para la activación de la reacción [$m^3/(kg*s)$]

C_{ox} : Concentración de Oxígeno en solución [kg/m^3]

$C_{ox,0}$: Concentración inicial de Oxígeno [kg/m^3]

E_1 : Energía de Activación de las bacterias [J/mol]

E_2 : Energía de de inhibición de las bacterias [J/mol]

E_m : Energía de Activación del Mineral [J/mol]

F_{ox} : Factor adimensional relacionado con la sobrevivencia de las bacterias.

$G_{Bacterias}$: Calor generado por las bacterias [W/m^3]

$G_{Reacciones}$: Calor generado por las reacciones químicas [W/m^3]

Q_m, Q_b : Entalpía de la reacciones químicas y bacterias, respectivamente. [J/kg]

R : Constante de gases ideales [J/(mol*K)]

ε_s : Fracción volumétrica correspondiente al sólido [m^3/m^3]

ρ_s, ρ_b : Densidad del sólido y bacterias, respectivamente. [kg/m^3]

Ambas generaciones de energía se encuentran en función de la concentración de oxígeno (C_{ox}) por lo cual se incluye una ecuación para la difusión de oxígeno en el medio, esta ecuación contiene un término de consumo de oxígeno debido por las reacciones químicas y el incremento de la temperatura.

$$\varepsilon_G \frac{\partial C_{ox}}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 C_{ox} - G_{ox} \quad (2.28)$$

$$D_{eff} = (\varepsilon_L + \varepsilon_G) D_{air,m} \quad (2.29)$$

$$G_{ox} = \varepsilon_s A_c \rho_s C_{ox} e^{\left(\frac{-E_c}{RT}\right)} \quad (2.30)$$

Donde:

A_c : Factor Pre-Exponencial para el consumo de oxígeno [$m^3/(kg*s)$]

D_{eff} : Difusividad efectiva [m^2/s]

$D_{air,m}$: Difusividad del aire en el fluido de irrigación [m^2/s]

E_c : Energía de Activación para el consumo de oxígeno [J/mol]

G_{ox} : Consumo de Oxígeno [$kg/(m^3*s)$]

ε_G : Fracción volumétrica del gas en el medio [m^3/m^3]

ε_L : Fracción volumétrica del líquido en el medio [m^3/m^3]

Notar que la generación de calor en las reacciones (Ecc. 2.24-2.27) está estrechamente relacionada al consumo de oxígeno (Ecc. 2.28).

2.3.4 Condiciones Iniciales y de Borde:

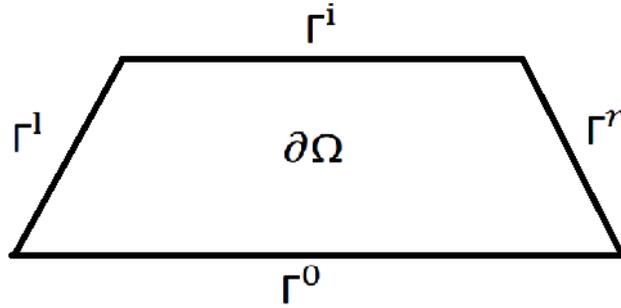
Se considera una frontera 2D expresada como $\partial\Omega = \Gamma^i \cup \Gamma^0 \cup \Gamma^l \cup \Gamma^r$, donde:

Γ^i : Frontera de entrada. Zona de irrigación.

Γ^0 : Frontera Basal. Zona de Aireación.

Γ^l : Talud Izquierdo

Γ^r : Talud Derecho



2.3-1: Fronteras 2D de la Pila

Para las ecuaciones de flujo bifásico (Ecc. 2.4 – 2.7) se tiene las siguientes condiciones iniciales y de borde.

Condición inicial de saturación del líquido y de presión para la fase gaseosa.

$$S_L(\vec{x}, t) = S_L^0, \quad \vec{x} \in \Omega, \quad t = 0,$$

$$p_g(\vec{x}, t) = p_A, \quad \vec{x} \in \Omega, \quad t = 0,$$

Condiciones de contorno para el líquido, ingreso de fluido a través del contorno superior, sin flujo por los taludes y sin variación de presión en la base.

$$(\vec{v}_L \cdot \vec{n})(\vec{x}, t) = -R_L, \quad \vec{x} \in \Gamma^i, \quad t > 0,$$

$$(\vec{v}_L \cdot \vec{n})(\vec{x}, t) = 0, \quad \vec{x} \in \Gamma^l \cup \Gamma^r, \quad t > 0,$$

$$(\nabla p_L \cdot \vec{n})(\vec{x}, t) = 0, \quad \vec{x} \in \Gamma^0, \quad t > 0,$$

Condiciones de contorno para la fase gaseosa, ingreso a través del contorno inferior, sin variación de saturación en los demás contornos.

$$(\vec{v}_g \cdot \vec{n})(\vec{x}, t) = R_g, \quad \vec{x} \in \Gamma^0, \quad t > 0,$$

$$(\nabla S_g \cdot \vec{n})(\vec{x}, t) = 0, \quad \vec{x} \in \Gamma^l \cup \Gamma^r \cup \Gamma^i, \quad t > 0,$$

Dónde:

p_A : Presión Atmosférica [Pa]

R_L : Tasa de irrigación en la parte superior. [L/m²h]

R_g : Tasa de aireación en la parte inferior [L/m²h]

S_L^0 : Saturación inicial en la pila [m³/m³]

Para la ecuación de la energía (Ecc. 2.21 - 2.30) se consideran las siguientes condiciones iniciales y de borde.

Condición inicial de temperatura y de concentración de oxígeno en la pila.

$$\begin{aligned} T(\vec{x}, t) &= T_0, & \vec{x} \in \Omega, & t = 0, \\ C_{ox}(\vec{x}, t) &= C_{ox,0}, & \vec{x} \in \Omega, & t = 0, \end{aligned}$$

Condición en la base de la pila, sin variación de temperatura ni de concentración de oxígeno.

$$\begin{aligned} (\nabla T \cdot \vec{n})(\vec{x}, t) &= 0, & \vec{x} \in \Gamma^0, & t > 0, \\ (\nabla C_{ox} \cdot \vec{n})(\vec{x}, t) &= 0, & \vec{x} \in \Gamma^0, & t > 0, \end{aligned}$$

Condición en los demás contornos, efectos ambientales como fenómenos conductivos, sin difusión de oxígeno en los bordes.

$$\begin{aligned} (-K_{eff} \nabla T \cdot \vec{n})(\vec{x}, t) &= q_{conv} + q_{rad}, & \vec{x} \in \Gamma^1 \cup \Gamma^r \cup \Gamma^i, & t > 0, \\ (-D_{eff} \nabla C_{ox} \cdot \vec{n})(\vec{x}, t) &= 0, & \vec{x} \in \Gamma^1 \cup \Gamma^r \cup \Gamma^i, & t > 0. \end{aligned}$$

Dónde:

$C_{ox,0}$: Concentración inicial de oxígeno en la pila. [kg/m³]

q_{conv} : Calor por convección del medio ambiente. [W/m²]

q_{rad} : Calor por radiación del medio ambiente. [W/m²]

T_0 : Temperatura inicial de la pila.[K]

La expresión para el calor por convección es:

$$q_{conv} = h [T - T_a(t)] \quad (2.31)$$

Donde el coeficiente de transferencia convectiva (h [W/(m²K)]), se puede asumir al considerar una velocidad del aire (v_A [m/s]), según Duffie y Beckman, 1980 [27]:

$$h = 5,7 + 3,8 * v_A \quad (2.32)$$

Para el término de la radiación se pueden considerar las ganancias de calor en el día y las pérdidas en la noche según:

$$q_{rad} = A \text{ sen}(\omega * t) \quad (2.33)$$

Donde:

A : Amplitud de la función radiación [W/m^2]

h : Coeficiente convectivo del aire [$W/(m^2 \cdot K)$]

t : Tiempo [s]

T_a : Temperatura ambiente [K]

v_A : Velocidad del aire [m/s]

ω : Frecuencia de la función radiación. [1/s]

2.4 Mecánica de Fluidos Computacional:

Para resolver el problema planteado se utilizará COMSOL Multiphysics el cual es un software de simulación numérica que trabaja en base a elementos finitos y contiene amplias capacidades de modelado físico, incluyendo ecuaciones de continuidad, momentum y energía para medios porosos y flujos multifásicos.

En principio se había considerado utilizar ANSYS Fluent, software usado para problemas de mecánica de fluidos y transferencia de calor en diversas industrias. Este software tiene una gran capacidad de modelado ya que trabaja en base a las ecuaciones generales de los fenómenos de transporte lo que permite una mayor flexibilidad para tratar los sistemas en estudio. Esta mayor flexibilidad en los análisis trae consigo una mayor dificultad en el manejo del software, especialmente para tratar problemas acoplados y para ingresar "Funciones definidas por el usuario", aumentando considerablemente el recurso computacional requerido y los tiempos de simulación.

Al constatar las dificultades dadas por ANSYS Fluent, se considera adecuado trasladar el estudio a COMSOL Multiphysics, el cual fue diseñado con los mismos fines.

A continuación se presentan las bases del software elegido para realizar los cálculos numéricos asociados abarcando las ecuaciones que utiliza para resolver la física del problema. [23]

2.4.1 Medios Porosos y Sistemas Multifásicos:

COMSOL Multiphysics presenta diversos módulos para tratar todo tipo de fenómenos físicos, entre ellos se presenta el "*Subsurface Flow Module*", específico para flujo en medios porosos, el cual contiene los siguientes sub-módulos:

- Ecuaciones de Brinkman
- Ecuación de Richards
- Flujo de fractura

- Ley de Darcy
- Flujo en medio libre y poroso
- Ley de Darcy para dos fases

Además en el módulo de “*Transferencia de Calor*” se presenta un sub-módulo para medios porosos al igual que en el módulo “*Transporte de especies químicas*”.

Cada uno de estos modelos presenta ecuaciones propias para resolver el fenómeno asociado, con la capacidad de acoplarse entre sí con el fin de resolver los problemas de forma realista.

En este estudio se utilizarán 3 de estos módulos:

- A) Ley de Darcy
- B) Transferencia de calor en medios porosos
- C) Transporte de especies diluidas

A continuación se presentan los modelos escogidos y las ecuaciones en las que estos se basan.

2.4.2 Módulo – Ley de Darcy:

Este módulo considera un medio poroso saturado de un fluido, basándose en la ecuación de continuidad y la Ley de Darcy para conocer el campo de presión y de velocidad de Darcy en el medio.

La ecuación de continuidad está dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho u) = Q_m \quad (2.34)$$

Donde:

Q_m : Término Fuente de momentum [kg/(m³*s)]

u : Velocidad en el medio [m/s]

ϵ_p : Fracción volumétrica del fluido en el medio [m³/m³]

ρ : Densidad del fluido [Kg/m³]

La Ley de Darcy se expresa como sigue:

$$u = \frac{-k}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla D) \quad (2.35)$$

Donde:

D : Altura [m]

g : Gravedad [m/s^2]

k : Permeabilidad del medio [m^2]

p : Presión [Pa]

u : Velocidad de Darcy en el medio [m/s]

μ : Viscosidad dinámica del fluido [Pa*s]

ρ : Densidad del fluido [Kg/m^3]

Cabe notar que la velocidad física será:

$$u = u_f * \epsilon_p \quad (2.36)$$

Donde:

u : Velocidad de Darcy [m/s]

u_f : Velocidad física del fluido [m/s]

2.4.3 Módulo – Transferencia de calor en medio poroso:

El módulo de transferencia de calor en medios porosos permite obtener perfiles de temperatura, flujos de energía, determinar la generación de calor, entre otros. Además, permite considerar las fuentes de calor volumétrica y de contorno, así como las pérdidas o ganancias de calor por convección, conducción o radiación.

En la ecuación para la transferencia de calor se consideran 2 fases, una sólida correspondiente al medio poroso y una fase fluida, que para este estudio será el fluido de irrigación.

Las ecuaciones de este módulo son:

$$(\rho C_{p,T})_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_{p,T})_{eff} \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) + Q \quad (2.37)$$

$$(\rho C_{p,T})_{eff} = \sum_{i=L,S} \epsilon_i \rho_i C_{p,i} \quad (2.38)$$

$$K_{eff} = \sum_{i=L,S} \epsilon_i \lambda_i \quad (2.39)$$

Donde:

$C_{p,i}$: Calor específico de la fase i [$J/(kg*K)$]

Q : Término fuente [W/m^3]

u : Campo de velocidad del fluido [m/s]

ε_i : Fracción volumétrica en el poro de la fase i [m^3/m^3]

λ_i : Conductividad térmica de la fase i [$W/(m^*K)$]

ρ_i : Densidad de la fase i [kg/m^3]

Sub índice “*eff*” denota las propiedades efectivas.

2.4.4 Módulo – Transporte de especies diluidas:

Se considera utilizar este módulo para conocer la difusión del oxígeno en el medio poroso, a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \nabla^2 C + G \quad (2.40)$$

Donde:

C : Concentración de la especie [kg/m^3]

D_e : Coeficiente de difusión efectiva [m^2/s]

G : Término fuente o consumo [$kg/(m^3*s)$]

Se pueden observar las diferencias con la ecuación 2.28 (difusión de oxígeno en el medio) dado que la anterior (2.40) no considera el efecto de las fracciones de la fase líquida y gaseosa.

Ya que el coeficiente de difusión y las fracciones de las fases presentes son constantes en toda la pila y durante el tiempo de simulación, se puede modificar el coeficiente con el fin de obtener uno efectivo para este caso, al igual que el consumo de oxígeno.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Metodología General:

3.1.1 Recopilación de Antecedentes:

Se realiza una búsqueda bibliográfica con el fin de comprender los principios de la biolixiviación, de conocer los estudios realizados a la fecha, poniendo especial atención a los que tratasen el tema de la transferencia de calor en medios porosos.

En esta recopilación de antecedentes se encontró una gran variedad de estudios relacionados con la biolixiviación, estos trabajos se pueden dividir en 3 grandes categorías: Estudios cualitativos, Estudios de modelamiento computacional y Estudios experimentales.

Los estudios cualitativos se centran en la explicación de los fenómenos asociados a la biolixiviación, mostrando los factores más influyentes en el rendimiento del proceso, haciendo énfasis, muchas veces, en los aspectos físico-químicos.

Los estudios de modelamiento computacional representan la gran mayoría de los trabajos encontrados, estos abarcan diferentes aspectos de la biolixiviación considerando diversas complejidades. La mayor parte de estos estudios son en una dimensión (1D) donde se considera el estudio, por separado, del flujo de irrigación en un medio no saturado, del balance de energía y del flujo de aireación.

Los estudios experimentales centrados en la transferencia de calor son muy escasos, casi la totalidad de estos son para columnas de biolixiviación a escala de laboratorios, con columnas de 1 [m] y 6 [m] de altura, estos estudios muestran la temperatura alcanzada en las columnas y la extracción de cobre obtenida.

3.1.2 Determinación del Modelo Físico-Matemático:

La determinación del modelo físico-matemático se llevo a cabo luego del estudio de los antecedentes recopilados que trataban acerca del transporte de fluidos y del balance de energía con reacciones químicas y biológicas en medios porosos.

Se plantea un modelo lo suficientemente completo para describir el comportamiento térmico de una pila de biolixiviación considerando las 3 fases presentes.

Se presentan las ecuaciones principales para el flujo de irrigación y aireación dentro de la pila en un medio variablemente saturado, así como la transferencia de calor en un sistema multifásico con generación de calor por reacciones químicas y biológicas, además de la difusión de oxígeno dentro del medio.

Se determinan además las condiciones iniciales y de borde para el modelo.

3.1.3 Simulación Termo-fluidodinámica:

Se realizan simulaciones termo-fluidodinámicas en 2D, superficie representada por la Figura 3.1-1, con el fin de encontrar contornos de temperatura al interior de la pila en un estado transiente. Estas simulaciones se realizan en el software COMSOL Multiphysics.

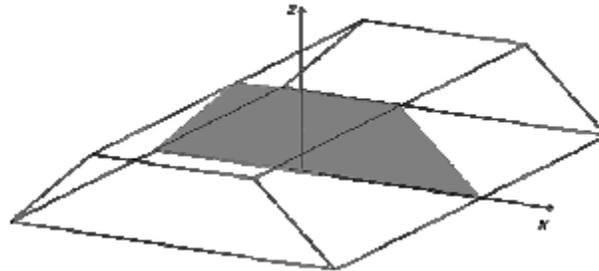


Figura 3.1-1: Superficie 2D de la pila

Las características principales de las simulaciones son:

- Sistema bifásico, medio poroso (pila) y fluido de irrigación.
- Campo de velocidad del fluido de irrigación al interior de la pila dado por la Ley de Darcy.
- Generación de calor en función de la temperatura correspondiente a la acción catalizadora de las bacterias.
- Efectos ambientales como la convección del viento y la radiación.

Estas simulaciones se dividirán en “Casos”, cada caso presenta alguna variante con respecto al anterior.

Los casos de estudio son:

Caso 1: Contraste entre distintas generaciones de calor

Caso 2: Efecto del tamaño de la pila

Caso 3: Efecto de la tasa de irrigación

Caso 4: Efecto del aumento en la temperatura de fluido de irrigación

Caso 5: Efecto de las condiciones ambientales

Caso 6: Efecto del consumo de oxígeno

3.1.4 Análisis y Discusión de Resultados:

Finalmente se analizarán y discutirán los resultados obtenidos con el fin de mostrar la consistencia del modelo, buscando dar explicaciones físicamente coherentes a los perfiles de temperatura encontrados al interior de la pila. Este análisis incluye la verificación de órdenes de magnitud con datos obtenidos de la literatura.

Cabe notar que los pasos planteados son iterativos ya que al obtener resultados insatisfactorios se vuelven a realizar las etapas previas, tanto del modelo físico-matemático, las condiciones iniciales y de borde, como las simulaciones numéricas, hasta lograr resultados coherentes.

En la siguiente figura se observa gráficamente la metodología seguida en este estudio.

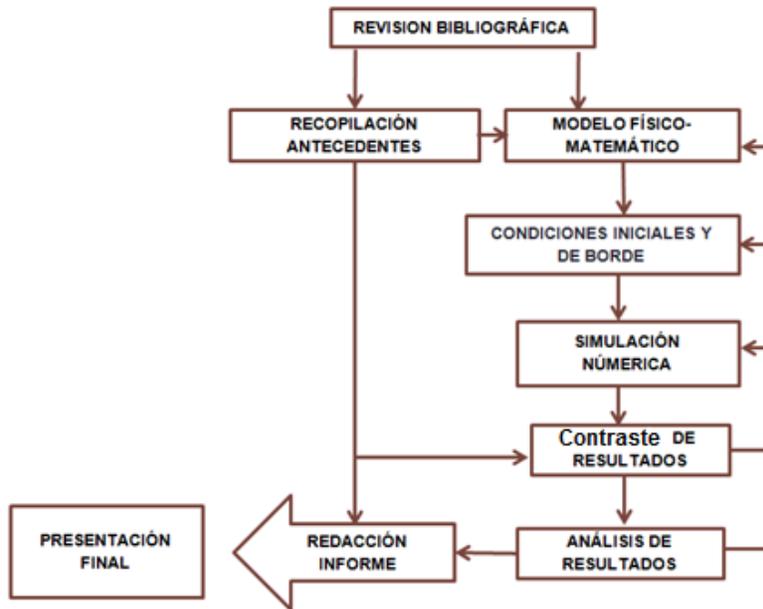


Figura 3.1-2: Diagrama de flujo de la metodología.

3.2 Metodología Específica:

3.2.1 Geometría de la Pila:

Se considera una geometría en 2D, de tamaño pequeño en consideración a las utilizadas por la industria, principalmente por el alto recurso computacional que se requeriría.

La pila principal estudiada tiene una base inferior de 50 [m], una altura de 10 [m], con talud de 1:1, la cual se muestra en la Figura 3.2-1

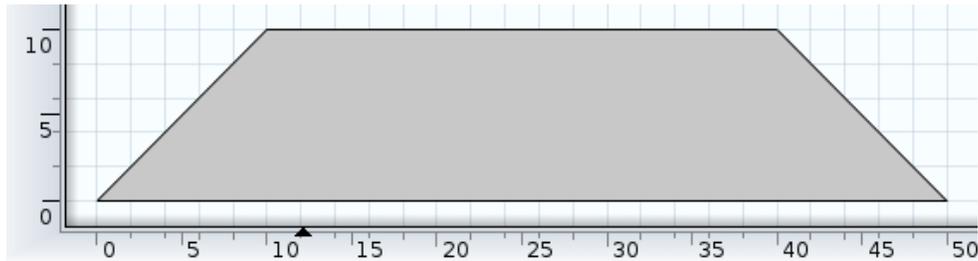


Figura 3.2-1: Geometría principal estudiada

3.2.2 Mallado:

Se realizaron diversos mallados con el fin de estudiar su sensibilidad a los resultados, desde estos primeros mallados se escogieron los que mejor se adecuaban a la geometría. A continuación se presentan los datos obtenidos para 5 mallas en la geometría de la Figura 3.2-1, donde se varía el tamaño de sus elementos, comenzando desde un mallado normal a uno extremadamente fino.

Las características principales de los mallados considerados son:

- Calibrado para dinámica de fluido, permitiendo elementos más finos.
- Mallado triangular libre.
- 8 capas límites en todos los bordes.

En la siguiente tabla se muestra los tamaños máximos y mínimos de los elementos, el número de elementos y su calidad media.

Tabla 3.2.1: Características de los mallados

	Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3	Mallado 4	Mallado 5
Tamaño Máximo de elemento [m]	0,45	0,35	0,28	0,13	0,067
Tamaño Mínimo de Elemento [m]	0,02	0,01	0,004	0,0015	0,0004
Número de Elementos	7.088	10.874	16.186	71.630	262.810
Calidad Media de Elemento	0,7016	0,7517	0,7902	0,8888	0,9355

Cabe notar que la calidad del elemento para un mallado triangular se mide al relacionar los lados del triángulo (distancia entre nodos) con un triángulo equilátero “óptimo”, por lo cual la calidad media de los elementos será cercana a 1 cuando la mayoría de los elementos sean triángulos equiláteros e irá disminuyendo mientras los triángulos se alejen de este óptimo.

Teniendo los mallados se realizó una primera simulación con las condiciones de generación de calor escogidas luego del caso 1, presentado en el capítulo 3.2.4.2.

Como principales característica del caso se considera la evaluación del campo de velocidad dado por la Ley de Darcy con una tasa de irrigación de 5 [L/m²h] y el campo de temperatura al considerar términos de generación de calor y convección forzada en los bordes.

La Tabla 3.2.2: Velocidad de Darcy y Temperatura para cada mallado muestra los resultados obtenidos para cada mallado en un periodo de evaluación de 365 días.

Tabla 3.2.2: Velocidad de Darcy y Temperatura para cada mallado

		Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3	Mallado 4	Mallado 5
Velocidad de Darcy [m/s]	Máxima	1,752E-06	1,768E-06	1,781E-06	1,821E-06	1,849E-06
	Promedio	1,075E-06	1,075E-06	1,072E-06	1,072E-06	1,072E-06
Temperatura [K]	Máxima	337,72	337,71	337,70	337,69	337,69
	Promedio	321,53	321,51	321,49	321,47	321,47

Al considerar los resultados obtenidos y los tiempos de simulación que consideraba cada mallado, se optó por el **Mallado 3**, el cual presenta leves diferencias con respecto al mallado 4. A pesar de que el mallado 4 tiene 71.630 elementos, mientras que el 3 solo 16.186, las diferencias observadas son despreciables, menores al 0,05 % para la temperatura promedio, por ejemplo.

Por otro lado, los tiempos de simulación aumentan considerablemente con el mallado 4, haciéndose aún mayores con el mallado 5, extremadamente fino, lo cual retrasa el trabajo a realizar sin aportar mayor precisión.

La siguiente figura muestra un detalle del mallado 3, el cual fue escogido para todas las simulaciones.

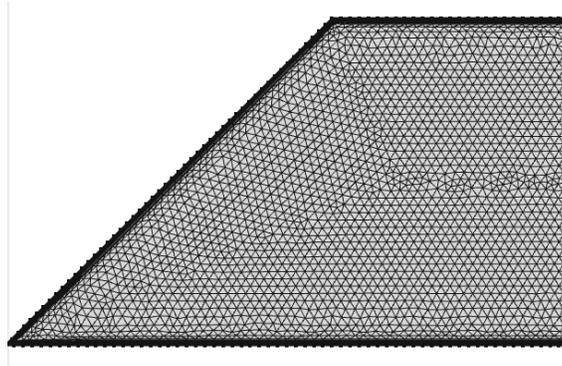


Figura 3.2-2: Detalle del Mallado 3, escogido.

3.2.3 Características principales de las simulaciones:

Las simulaciones se dividen en diversos casos, en los cuales se varían ciertas características con el fin de lograr una mayor comprensión en el comportamiento del sistema.

Cabe recordar las principales características del sistema a simular son:

- Sistema bifásico: medio poroso (pila) y fluido de irrigación.
- Campo de velocidad del fluido de irrigación al interior de la pila dado por la Ley de Darcy.
- Generación de calor en función de la temperatura correspondiente a la acción catalizadora de las bacterias.
- Efectos ambientales como la convección del viento y la radiación.

A continuación se describen los principales datos de entrada que son comunes para los casos estudiados.

3.2.3.1 Propiedades del fluido:

El fluido de irrigación lixiviante utilizado por la industria es una solución de agua y ácido sulfúrico cuyas propiedades no se han determinado con exactitud, pero dadas las bajas concentraciones de ácido sulfúrico otros autores ([16, 17, 19, 20, 21]) las han considerado iguales a las del agua, lo mismo que se hará en este estudio.

Las propiedades del agua se muestran en el anexo A.

3.2.3.2 Propiedades de la pila:

Las propiedades de la pila son constantes. Los datos presentados son utilizados en todas las simulaciones, salvo que se mencione lo contrario en la descripción específica de cada caso.

Los valores considerados han sido obtenidos desde la literatura y representan valores típicos en el proceso estudiado, estos pueden variar desde una pila a otra dependiendo las condiciones de aglomeración del material y del apilamiento.

- a) Porosidad (\emptyset) = 0.459 ([15])
- b) Fracción volumétrica del sólido (ϵ_s): 1-Porosidad = 0.541
- c) Permeabilidad (k): $6,23 * 10^{-11}$ [m²] ([15])
- d) Conductividad Térmica (λ_s): 2 [W/mK] ([19])
- e) Densidad (ρ_s) : 1700 [kg/m³] ([28])
- f) Calor Específico ($C_{p,s}$) : 1172 [J/kgK] ([19])

3.2.3.3 Propiedades de la generación de calor:

Las propiedades de la generación de calor son fundamentales para determinar el campo de temperatura al interior de la pila.

En primer lugar se realiza un caso utilizando los datos reportados por Zambra, entre otros autores, para la generación de calor dada por las bacterias y las reacciones químicas.

Luego se utiliza una generación de calor supuesta para este proceso, y se contrastan las temperaturas alcanzadas para finalmente escoger una generación que represente de mejor forma el sistema en estudio.

A continuación se presentan las generaciones de calor consideradas.

Baja generación de calor – Parámetros de la literatura:

Los datos, de esta “Baja generación de calor”, vienen desde la industria de las Pilas de Compost y han sido usados en diferentes trabajos ([16,17,20]), Zambra los utiliza para un estudio sobre biolixiviación ([20]), pero se considera necesario validarlos a través de estudios experimentales.

En la siguiente tabla se muestran las propiedades de la generación de calor por reacciones químicas.

Tabla 3.2.3: Propiedades generación de calor por reacciones químicas (literatura) [20]

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Q_m	5,50E+09	[J/kg]	Entalpía de generación química
A_m	1,80E+04	[m ³ /(kg*s)]	Factor Pre-Exp. Activación química
ρ_s	1700	[kg/m ³]	Densidad aparente del material
E_m	1,40E+05	[J/mol]	Energía de Activación química
C_{ox}	2,72E-01	[kg/m ³]	Concentración de oxígeno

Estos parámetros se utilizan en la ecuación 2.25, la cual graficada en función de la temperatura da la siguiente figura.

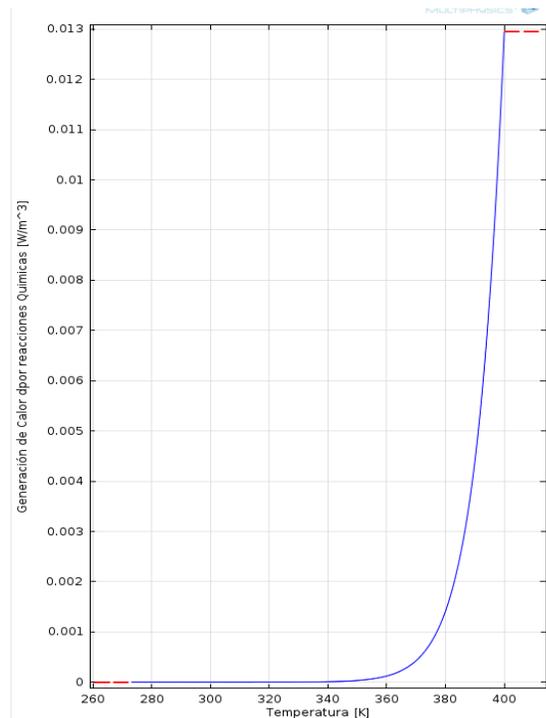


Figura 3.2-3: Generación de calor por reacciones químicas

En la figura 3.2-3, anterior se observa una muy baja generación de calor por reacciones químicas, la cual comienza a elevarse desde los 360 [K] (87 [°C]), siendo aún insuficiente para lograr un aumento de la temperatura.

La tabla 3.2.4 muestra los parámetros para la generación de calor dada por las bacterias, esta generación será definida como “Generación de Calor por Bacterias, Tipo A”, para diferenciarla de la generación descrita más adelante.

Tabla 3.2.4: Propiedades generación de calor de las bacterias, tipo A [20]

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Q_b	7,66E+06	[J/kg]	Entalpía de generación
ε_s^*	0,541		Fración de sólido
ρ_b^{**}	575	[kg/m ³]	Densidad de biomasa
F_{ox}	1		Factor concentración de oxígeno
A_1	1,00E+08	[1/s]	Factor Pre-exp. De activación
E_1	1,00E+05	[J/mol]	Energía de activación bacterias
A_2	6,86E+32		Factor Pre-exp. De inhibición
E_2	2,00E+05	[J/mol]	Energía de inhibición bacterias
R	8,314.472	[J/(mol*K)]	Constante gases ideales

* Se calcula considerando una porosidad de 0,459 [15]

** Densidad considerada en la industria del Compost [20]

El factor de concentración de oxígeno es 1 ya que en principio se considera que la cantidad de oxígeno no varía dentro de la pila, manteniéndose constante en 0,272 [kg/m³].

Estos parámetros son los necesarios para la ecuación 2.26, generación de calor dada por las bacterias, ecuación que en función de la temperatura da el siguiente gráfico.

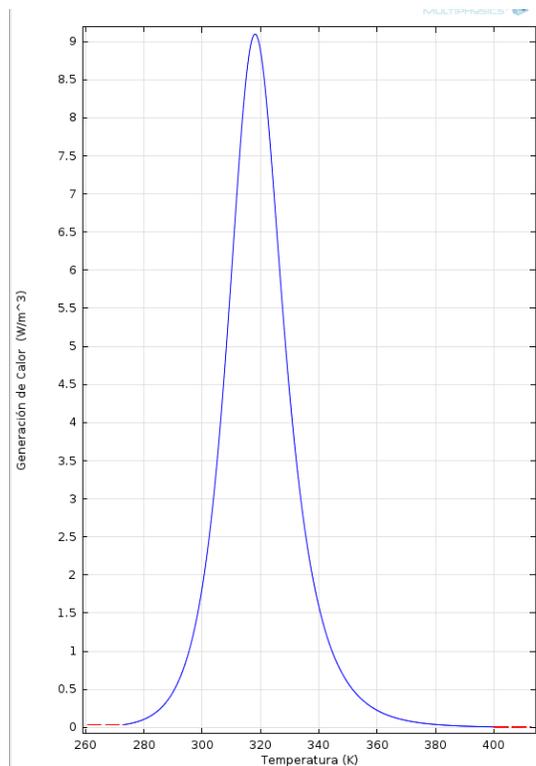


Figura 3.2-4: Generación de calor de las bacterias, Tipo A, en función de la temperatura

La generación de calor por bacterias tiene una alta dependencia de la temperatura, mostrándose máxima a los 318 [K] (45 [°C]), llegando a los 9.09 [W/m³]. Esta generación es bastante menor a la reportada en algunos estudios, como los referenciados en [16, 28, 29].

Los datos presentados anteriormente se utilizan solo en la primera parte del Caso 1 (Contraste entre generaciones de calor), ya que, como se verá en el capítulo de resultados, al usar esta generación de calor la temperatura del sistema casi no aumenta.

Por lo anterior, se decide utilizar una generación de calor supuesta que este acorde a lo reportado por otros estudios.

Generación de calor supuesta:

Se realiza un acercamiento cualitativo a la generación de calor por microorganismos en la biolixiviación la que se puede modelar según las ecuaciones utilizadas por Zambra [20] en la industria del Compost. Este acercamiento es del orden de magnitud y de su dependencia con la temperatura el cual se analiza en el capítulo de resultados para el Caso 1 (Capítulo 4.2.1)

Los parámetros supuestos para lograr una mayor generación de calor de las bacterias se observan en la siguiente tabla, "Generación de calor por Bacterias, tipo B".

Tabla 3.2.5: Parámetros estimados para una generación de calor mayor de las bacterias, tipo B

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Q_b	9,89E+07	[J/kg]	Entalpía de generación
ε_s^*	0,541		Fracción de sólido
ρ_b^{**}	575	[kg/m ³]	Densidad de biomasa
F_{ox}	0,9		Factor concentración de oxígeno
A_1	6,66E+08	[1/s]	Factor Pre-exp. De activación
E_1	1,00E+05	[J/mol]	Energía de activación bacterias
A_2	4,86E+33		Factor Pre-exp. De inhibición
E_2	1,98E+05	[J/mol]	Energía de inhibición bacterias
R	8,314472	[J/(mol*K)]	Constante gases ideales

* Se calcula considerando una porosidad de 0,459 [15]

** Densidad considerada en la industria del Compost [20]

Los cuales generan el siguiente gráfico en función de la temperatura.

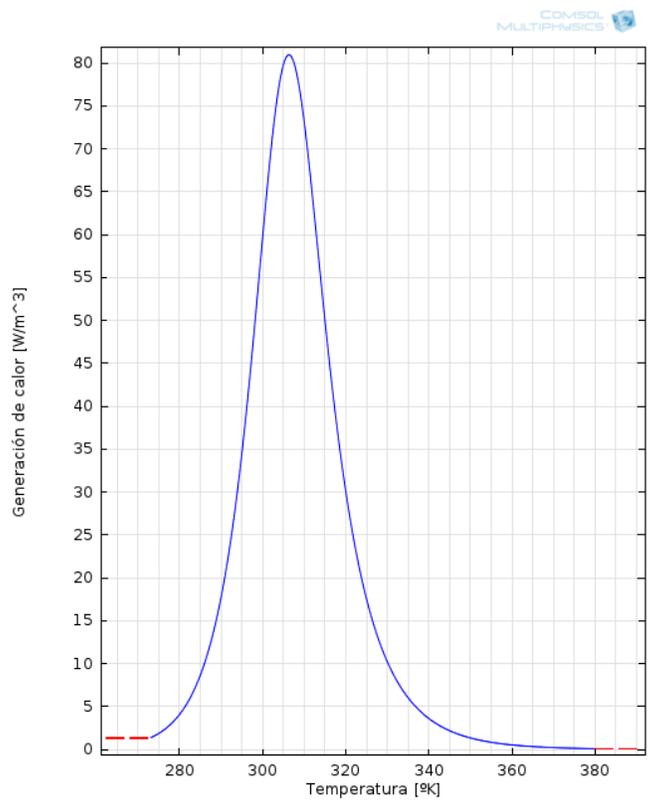


Figura 3.2-5: Generación de calor mayor estimada para las bacterias, tipo B.

La dependencia de la generación con la temperatura está dado por la influencia de la temperatura con las bacterias, donde su máxima generación se da a los 307 [K] (34 [°C]) y es de 81 [W/m³].

Cabe notar que en la segunda parte del Caso 1 (Contraste entre distintas generaciones de calor) se utilizan fuentes de calor que son múltiplos de la generación tipo B, es decir, mantendrán la misma forma que en la Figura 3.2-5, pero la máxima generación alcanzada variará de la siguiente forma:

- A.- 1/9 de la Generación tipo B. Generación Máxima: 9 [W/m³]
- B.- 1/3 de la Generación tipo B. Generación Máxima: 27 [W/m³]
- C.- Generación tipo B. Generación Máxima: 81 [W/m³]
- D.- 1,5 veces la Generación tipo B. Generación Máxima: 121 [W/m³]

Del análisis de resultados para estas generaciones de calor se decide cual utilizar en los demás casos de estudio.

3.2.4 Definición de los casos de estudio:

En primer lugar se definen las condiciones utilizadas para el modelo que sigue la ley de Darcy, el cual es común para la mayoría de los casos, y luego se definen las condiciones para el modelo de transferencia de calor para cada caso.

Para las condiciones de borde se considera una frontera 2D expresada como:

$$\partial\Omega = \Gamma^i \cup \Gamma^0 \cup \Gamma^l \cup \Gamma^r,$$

Donde:

Γ^i : Frontera de entrada. Zona de irrigación.

Γ^0 : Frontera Basal. Zona de Aireación.

Γ^l : Talud Izquierdo

Γ^r : Talud Derecho

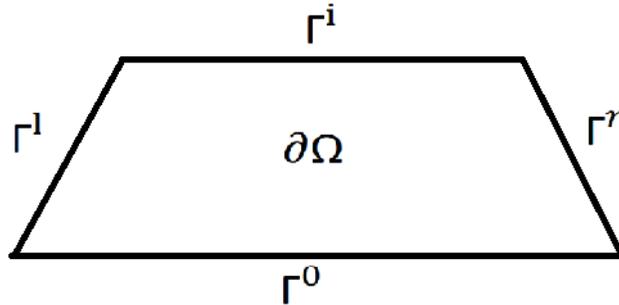


Figura 3.2-6: Fronteras 2D de la Pila

3.2.4.1 Modelo Ley de Darcy:

En todas las simulaciones se calcula un campo de presión y velocidad al interior de la pila, campos dados por la ley de Darcy para un medio saturado del fluido de irrigación, que se considera con las propiedades del agua a temperatura constante.

Los campos de presión y velocidad, calculados a partir de las formulas presentadas en el capítulo 2.4.2, son constantes en el tiempo de simulación.

Como entrada de este modelo se considera:

- Temperatura constante: 293,15 [K], 20 [°C].
- Acción de la gravedad: 9,81 [m/s²] (-y)

La condición inicial es de presión en todo el dominio igual a 1 [atm].

Las condiciones de borde para cada frontera son:

Γ^i : Velocidad de entrada de 5 [L/h/m²], lo que equivale a una velocidad de 1,338*10⁻⁶ [m/s].

Esta velocidad es utilizada en todo el estudio salvo en el caso 3 - Efecto de la tasa irrigación, donde la velocidad será variada con el fin de estudiar su efecto en el campo de temperatura.

Γ^0 : Presión de salida de 0 [Pa].

Esta condición permite la simulación del flujo del fluido desde el borde superior hacia el inferior.

Γ^l : Sin flujo.

Γ^r : Sin flujo.

3.2.4.2 Modelo Transferencia de Calor:

A continuación se presentan las condiciones de los 6 casos de estudio.

Gran parte de estos casos tuvo que realizarse en repetidas ocasiones variando distintos parámetros para llegar a resultados físicamente coherentes. En lo que sigue se definen los principales casos estudiados, los que finalmente serán reportados en el capítulo de resultados.

a. Caso 1 - Contraste para diferentes generaciones de calor:

Descripción:

Se considera la sección transversal de una pila de biolixiviación con 50 [m] de base, 10 [m] de altura y talud 1:1 (Figura 3.2-1).

En primer lugar se estudia la temperatura alcanzada por la pila utilizando datos de la literatura, las generaciones de calor volumétrica por reacciones químicas y biológicas (Figura 3.2-3 y Figura 3.2-4), esta generación de calor se considera como “Baja generación de calor” debido a que su máxima generación es de solo 9 [W/m³].

Luego se supone una nueva generación de calor, “alta generación de calor” (Figura 3.2-5), la cual se obtiene de forma cualitativa correspondiente a la aproximación de una generación de calor esperada

en este proceso. Se contrastan los resultados para 4 generaciones de calor múltiplos de la generación de calor supuesta.

La convección interior se produce debido al campo de velocidad generado por la Ley de Darcy. Como fenómeno de contorno se considera la convección forzada del aire.

De este caso se escoge la generación de calor a usar en el resto de las simulaciones.

Parámetros de entrada:

- Propiedades térmicas de la pila
- Campo de velocidad dado por la Ley de Darcy
- Temperatura inicial de la pila: 289,15 [K] = 16 [°C]
- Presión absoluta: 1 [atm]

Condiciones de borde y en el dominio:

$\partial\Omega$:

En principio se evalúa la generación de calor volumétrica por reacciones químicas y biológicas dadas en la literatura (Generación de calor A o baja generación), según la Figura 3.2-3 y la Figura 3.2-4.

Luego, Se consideran 4 generación de calor volumétrica por reacciones biológicas (Generación de calor tipo B), según la Figura 3.2-5.

Las 4 generaciones de calor son múltiplos de la tipo B, de la siguiente forma:

- A.- 1/9 de la Generación tipo B. Generación Máxima: 9 [W/m³]
- B.- 1/3 de la Generación tipo B. Generación Máxima 27 [W/m³]
- C.- Generación tipo B. Generación Máxima: 81 [W/m³]
- D.- 1,5 veces la Generación tipo B. Generación Máxima: 121 [W/m³]

Γ^i , Γ^l , Γ^r : Convección forzada del aire a una temperatura ambiente de 289,15 [K] = 16 [°C].

El coeficiente convectivo (h) se calcula a partir de la ecuación 2.32, con una velocidad del aire de 2 [m/s], obteniéndose un $h = 13.3$ [W/(m²*K)].

Γ^0 : Aislamiento térmico.

b. Caso 2 - Efecto del tamaño de la pila:

Descripción:

Se consideran 3 pilas de diferentes tamaños, proporcionales a la usada anteriormente, presentada en la Figura 3.2-1, La generación de calor utilizada es la generación tipo B (Figura 3.2-5).

La convección interior se produce debido al campo de velocidad generado por la Ley de Darcy. Como fenómeno de contorno se considera la convección forzada del aire.

Las pilas a considerar son:

- A) 25 [m] de base, 5 [m] de altura y talud 1:1
- B) 50 [m] de base, 10 [m] de altura y talud 1:1
- C) 100 [m] de base, 20 [m] de altura y talud 1:1

Parámetros de entrada:

- Propiedades térmicas de la pila
- Campo de velocidad dado por la Ley de Darcy
- Temperatura inicial de la pila: 289,15 [K] = 16 [°C]
- Presión absoluta: 1 [atm]

Condiciones de borde y en el dominio:

$\partial\Omega$: La generación de calor volumétrica, generación de calor tipo B, según la Figura 3.2-5.

Γ^i , Γ^l , Γ^r : Convección forzada del aire a una temperatura ambiente de 289,15 [°K] = 16 [°C].

El coeficiente convectivo (h) se calcula a partir de la ecuación 2.32, con una velocidad del aire de 2 [m/s], obteniéndose un $h = 13.3$ [W/(m*K)].

Γ^0 : Aislamiento térmico.

c. Caso 3 - Efecto de la tasa de irrigación:

Descripción:

Se considera la pila de 50 [m] de base, 10 [m] de altura y talud 1:1 (Figura 3.2-1), con la generación de calor mayor, generación tipo B (Figura 3.2-5).

La convección interior se produce debido al campo de velocidad generado por la Ley de Darcy, para diferentes tasas de irrigación, en primer lugar se evalúa la sensibilidad del modelo cuando la tasa de irrigación es de 0 [L/hm²], las demás tasas consideradas son:

- A) 2,5 [L/hm²]
- B) 5 [L/hm²]
- C) 10 [L/hm²]

Como fenómeno de contorno se considera la convección forzada del aire.

Parámetros de entrada:

- Propiedades térmicas de la pila
- Campo de velocidad dado por la Ley de Darcy
- Temperatura inicial de la pila: 289,15 [K] = 16 [°C]
- Presión absoluta: 1 [atm]

Condiciones de borde y en el dominio:

$\partial\Omega$: Generación de calor volumétrica, generación de calor tipo B, según la Figura 3.2-5.

Γ^i , Γ^l , Γ^r : Convección forzada del aire a una temperatura ambiente de 289,15 [°K] = 16 [°C].

El coeficiente convectivo (h) se calcula a partir de la ecuación 2.32, con una velocidad del aire de 2 [m/s], obteniéndose un $h = 13.3$ [W/(m²*K)].

Γ^0 : Aislamiento térmico.

d. Caso 4 - Efecto del aumento de la temperatura del fluido de irrigación:

Descripción:

Se considera la pila de 50 [m] de base, 10 [m] de altura y talud 1:1 (Figura 3.2-1), con la generación de calor mayor, generación tipo B (Figura 3.2-5).

La convección interior se produce debido al campo de velocidad generado por la Ley de Darcy, para una tasa de irrigación de 5 [L/hm²] (al igual que en el resto de los casos)

Como fenómeno de contorno se considera la convección forzada del aire y una fuente de calor debido al aporte energético del líquido. Esta fuente de calor se evalúa para 3 temperaturas de ingreso del fluido:

- A) Sin efecto de la temperatura de ingreso
- B) Temperatura de ingreso de 291,15[K] (18 [°C])
- C) Temperatura de ingreso de 301,15[K] (28 [°C])
- D) Temperatura de ingreso de 311,15[K] (38 [°C])

Calor aportado por el fluido de irrigación:

El calor que aporta el fluido al sistema se simula como una fuente de calor de contorno, a través de la siguiente ecuación:

$$q_{\text{entrada fluido}} = v_L * \rho * c_p * (T_{\text{entrada}} - T) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.1)$$

Donde:

c_p : Calor Específico [J/(kg*K)]

T : Temperatura del borde de la pila [K]

T_{entrada} : Temperatura de entrada del fluido [K]

v_L : Velocidad de ingreso del fluido. [m/s]

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

Notar que si la temperatura del borde de la pila es mayor se tendrá un flujo saliente de calor.

Parámetros de entrada:

- Propiedades térmicas de la pila
- Campo de velocidad dado por la Ley de Darcy
- Temperatura inicial de la pila: 289,15 [K] = 16 [°C]
- Presión absoluta: 1 [atm]

Condiciones de borde y en el dominio:

$\partial\Omega$: Generación de calor volumétrica, generación de calor tipo B, según la Figura 3.2-5

Γ^i :

- a) Calor aportado por el fluido de irrigación, ecuación 3.1

La velocidad de entrada corresponde a la misma utilizada en el campo de velocidad de Darcy, siendo de 5 [L/h/m²] o de 1,338*10⁻⁶ [m/s].

La temperatura de entrada del fluido será de:

- A) Sin efecto de la temperatura de ingreso
- B) Temperatura de ingreso: 291,15[K] (18 [°C])
- C) Temperatura de ingreso: 301,15[K] (28 [°C])
- D) Temperatura de ingreso: 311,15[K] (38 [°C])

La densidad y el calor específico se calculan a la temperatura del borde de la pila.

- b) Convección forzada del aire a una temperatura ambiente de 289,15 [°K] = 16 [°C].

El coeficiente convectivo (h) se calcula a partir de la ecuación 2.32, con una velocidad del aire de 2 [m/s], obteniéndose un h = 13.3 [W/(m*K)].

Γ^l, Γ^r : Convección forzada del aire, definida para el contorno superior.

Γ^0 : Aislamiento térmico.

e. Caso 5 - Efecto de las condiciones ambientales:

Descripción:

Se considera la pila de 50 [m] de base, 10 [m] de altura y talud 1:1 (Figura 3.2-1), con la generación de calor mayor, generación tipo B (Figura 3.2-5).

La convección interior se produce debido al campo de velocidad generado por la Ley de Darcy,

La influencia de los fenómenos de contorno es el centro de este caso, donde se escoge una localidad en el norte de Chile, cercano a la minera Zaldívar, tomando datos de radiación solar, temperatura ambiental y velocidad del viento.

Como caso de interés se considera el efecto de la evaporación en el contorno superior, los beneficios de cubrir la pila atenuando los efectos ambientales y el efecto de subir la temperatura del fluido de irrigación además de cubrir la pila.

Antes de definir los parámetros de la simulación, se describirían los datos obtenidos de la localidad escogida y como estos se llevan al modelo de transferencia de calor.

Localidad escogida:

Se evalúa el recurso solar y las condiciones ambientales en las cercanías de la minera Zaldívar, quienes tienen pilas de lixiviación en terreno y podrían utilizar la Biolixiviación.

Esto se realiza a través del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, para las siguientes coordenadas [30]:

- Latitud: 24,1 ° S
- Longitud: 69,3 ° O
- Elevación: 1959 [m]

Radiación solar:

Se desea estudiar los aportes de la radiación solar como una fuente de calor de contorno.

El ciclo anual de insolación diaria es:

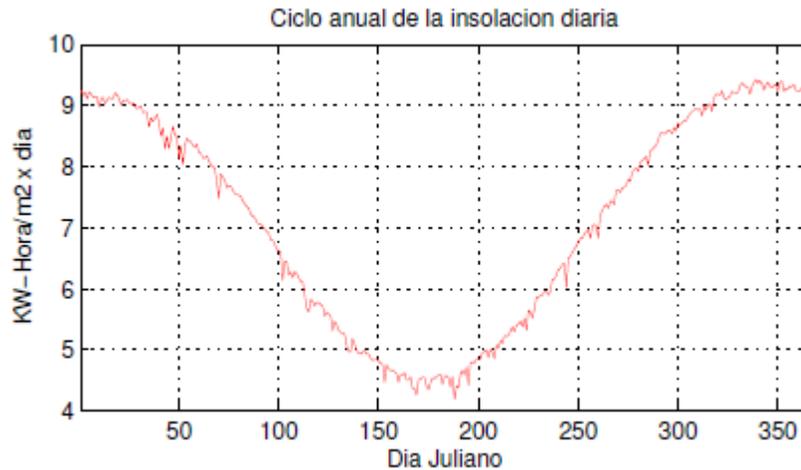


Figura 3.2-7: La figura muestra el promedio entre los años 2003 y el 2011 de la insolación diaria

Como se sabe, la insolación es la cantidad de energía, en forma de radiación, que llega a un lugar de la Tierra en un día concreto.

Dado que es la energía en un día, se puede saber la potencia promedio a la que está expuesta esa área durante el día. De la siguiente forma:

$$\text{Potencia Promedio Diaria} \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{\text{Insolación} \left[\frac{KWh}{m^2} \right]}{24 [h]} * 1000 \quad (3.2)$$

Para ingresar esto al modelo como una fuente de calor de contorno, se busca una función que se aproxime al ciclo anual de insolación diaria. Una función de la siguiente forma:

$$q_{\text{Radiación}} = \alpha(A \text{ sen}(\omega * t + B) + C) \quad (3.3)$$

Donde:

A: Amplitud de la radiación [W/m^2]

B: Fase de la función

C: Desfase de la función [W/m^2]

α : Absortividad

ω : Frecuencia de la función radiación [$1/s$]

Utilizando los parámetros de la Tabla 3.2.6, se llega a la aproximación del ciclo anual de insolación, presentado en la Figura 3.2-7

Cabe considerar que la frecuencia fue calculada considerando pasos de tiempo de 86.400 [seg], lo que equivale a 1 día.

Tabla 3.2.6: Parámetros de la función insolación diaria en [Kwh/m²]

Parámetro	Valor
A , Amplitud [Kwh/m²]	2,67
B , Fase	2
C , Desfase [Kwh/m²]	6,8
ω , Frecuencia	1,72E-07

Finalmente se llega a la función de la radiación buscada, al transformar la Amplitud (A) y el Desfase (C) a las unidades requeridas, la cual se puede ver gráficamente en la Figura 3.2-8

Tabla 3.2.7: Parámetros de la función insolación diaria en [W/m²]

Parámetro	Valor
A , Amplitud [W/m²]	111,25
B , Fase	2
C , Desfase [W/m²]	283,333
ω , Frecuencia	1,72E-07

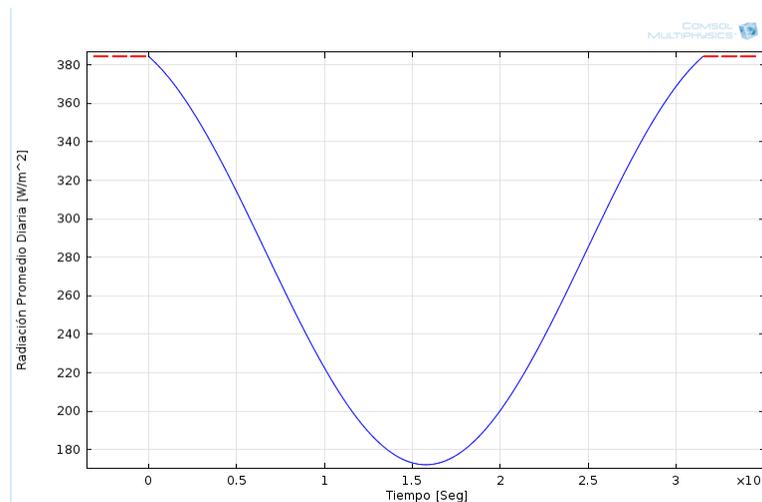


Figura 3.2-8: Ciclo anual de la radiación promedio diaria según ecuación 3.3 y tabla 3.2.7

Radiación desde la superficie de la pila al ambiente:

La radiación emitida por la pila también es una condición de contorno. La ecuación que modela esta emisión es:

$$q_{Emitido} = \epsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.4)$$

Donde:

T : Temperatura de la superficie de la pila [K]

T_{amb} : Temperatura ambiente [K]

ϵ : Emisividad de la Pila

σ : Constante de Stefan-Boltzmann. $5,6704 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)]

Evaporación:

Se ha calculado según lo propuesto por Dixon 2000 [30].

$$q_{Evaporación} = -k_g * \rho_a * L_v * (\psi(T) - HR_{\infty} * \psi(T_{\infty})) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.5)$$

Donde:

HR_{∞} : Humedad Relativa del ambiente (%)

k_g : Coeficiente de transferencia másica [m/s]

ρ_a : Densidad del aire [kg/m³]

L_v : Calor de vaporización [J/kg]

$\psi(T)$: Humedad de Saturación

La humedad de saturación (ψ) se define como la máxima cantidad de vapor de agua que puede haber en una cantidad concreta de aire. Según la siguiente ecuación.

$$\psi(T) = \frac{0,6242 P_v(T)}{P - P_v(T)} \quad (3.6)$$

Donde:

$P_v(T)$: Presión de vapor del agua a la temperatura considerada. [Atm]

P : Presión del sistema [Atm]

La presión de vapor se calcula en función de la temperatura según la siguiente tabla.

Tabla 3.2.8: Presión de vapor en función de la temperatura

Temperatura [°C]	Presión vapor [mmHg]	Presión vapor [Atm]
0	4,579	0,0060
5	6,543	0,0086
10	9,209	0,0121
15	12,788	0,0168
20	17,535	0,0231
25	23,756	0,0313
30	31,824	0,0419
35	42,175	0,0555
40	55,324	0,0728
45	71,882	0,0946
50	92,511	0,1217
55	118,04	0,1553
60	149,38	0,1966
65	187,54	0,2468
70	233,71	0,3075
75	289,1	0,3804
80	355,11	0,4673
85	433,62	0,5706
90	525,76	0,6918
95	633,9	0,8341
100	760	1,0000

Por otro lado, el coeficiente de transferencia másica (k_g), se determina con la analogía de Chilton-Colburn:

$$\frac{Sh}{Nu} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{1/3} = Le^{1/3} = \left(\frac{k}{\rho C_p D_v}\right)_a^{1/3} \quad (3.7)$$

Entonces,

$$\frac{k_g \rho_a C_{pa}}{h} = \left(\frac{\rho C_p D_v}{k}\right)_a^{2/3} - Le^{2/3} \quad (3.8)$$

Donde:

C_{pa} : Calor específico del aire [J/kgK]

D_v : Difusividad del vapor de agua en el aire [m²/s]

h : Coeficiente convectivo del aire [W/m²K]

k : Conductividad térmica del aire [W/mK]

Le : Número de Lewis

Nu : Número de Nusselt

Sc : Número de Schmidt

Sh : Número de Sherwood

Finalmente el calor perdido por evaporación se calcula en función de los siguientes parámetros:

Tabla 3.2.9: Parámetros usados para la evaporación [31]

Parámetro	Valor
Le	1,25
ρ_a [kg/m ³]	1,09
C_{pa} [J/kgK]	1000
k [W/mK]	0,026
D_v [m ² /s]	0,000025
L_v [kJ/kg]	2360

Temperatura ambiente y velocidad del viento:

La siguiente figura muestra el gráfico de las temperaturas medias mensuales para todo el año, utilizado en la simulación.

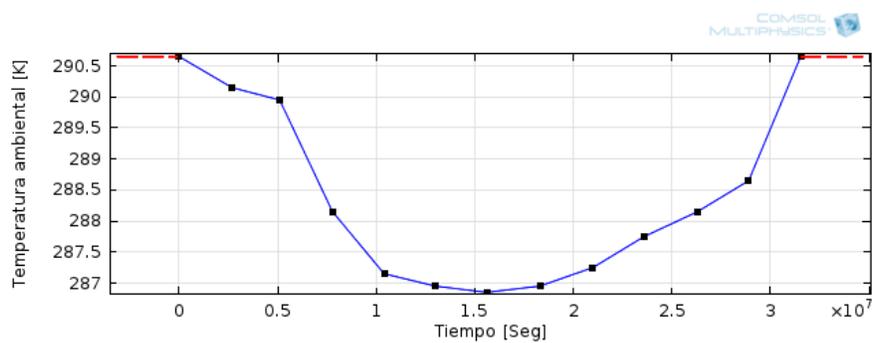


Figura 3.2-9: Temperatura promedio del ambiente [K]

El ciclo estacional de viento utilizado en las simulaciones esta dado por la siguiente figura.

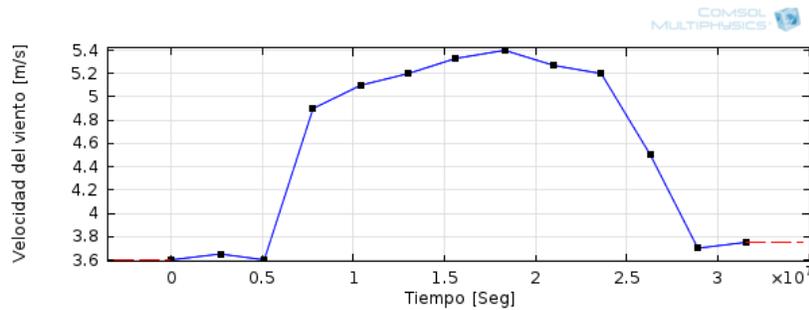


Figura 3.2-10: Velocidad promedio del viento [m/s]

La velocidad del viento modifica el coeficiente convectivo exterior según la ecuación 2.32, lo que genera la siguiente figura.

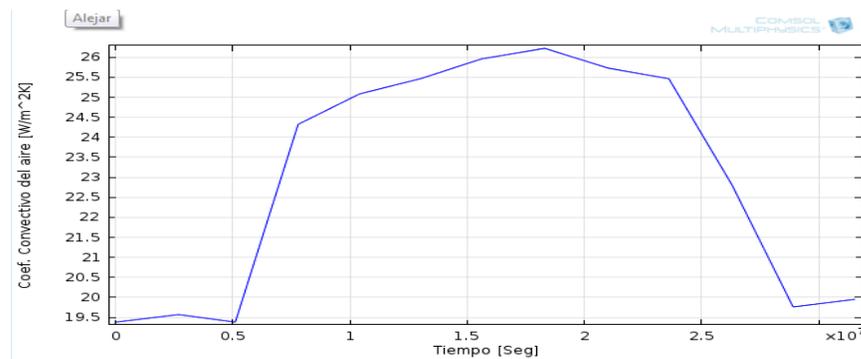


Figura 3.2-11: Coeficiente convectivo del aire según la velocidad del viento promedio en el año

Determinadas las condiciones ambientales del lugar y como están se implementan en el modelo de transferencia de calor, se pueden determinar los parámetros correspondientes.

Cabe notar que la absorptividad, la emisividad, la humedad relativa y el coeficiente convectivo externo variarán dependiendo si la pila está cubierta o no, estos datos fueron obtenidos desde Dixon 2000. [31]

Parámetros de entrada:

- Propiedades térmicas de la pila
- Campo de velocidad dado por la Ley de Darcy
- Temperatura inicial de la pila: 291,15 [K] = 18 [°C]
- Presión absoluta: 1 [atm]

Condiciones de borde y en el dominio:

$\partial\Omega$: Generación de calor volumétrica por reacciones biológicas (Generación de calor, tipo B), según la Figura 3.2-5

Γ^i :

- a) Convección forzada del aire a la temperatura ambiente y velocidad del viento de la zona escogida.

Tabla 3.2.10: Coeficiente convectivo pila cubierta y descubierta

	Descubierta	Cubierta
Coef. Convec.	Figura 3.2-11	(1/4) del anterior

- b) Radiación solar incidente, según la Figura 3.2-8, la cual debe ser ponderada por la absorptividad de la pila.

Tabla 3.2.11: Absortividad pila cubierta y descubierta

	Descubierta	Cubierta
Absortividad	0,7	0,5

- c) Radiación emitida por la pila, según la ecuación 3.4, y la temperatura ambiente, Figura 3.2-9

Tabla 3.2.12: Emisividad pila cubierta y descubierta

	Descubierta	Cubierta
Emisividad	0,675	0,3

- d) Evaporación, según la ecuación 3.5, y humedad relativa.

Tabla 3.2.13: Humedad relativa del ambiente pila cubierta y descubierta

	Descubierta	Cubierta
Humedad Relativa	30%	100%

- e) Calor aportado por fluido de irrigación, según la ecuación 3.1, con una temperatura de entrada de 301,15 [K] (28 [°C]).

Esta condición solo se ocupa una vez, para observar su influencia.

Γ^l, Γ^r :

- a) Radiación solar incidente, definida para el contorno superior pero multiplicada por un factor de pérdida, asociada a inclinación y orientación, del 50%.
- b) Convección forzada del aire, definida para el contorno superior.
- c) Radiación emitida por la pila, definida para el contorno superior.

Γ^0 : Aislamiento térmico.

f. Caso 6 - Efecto de la concentración de oxígeno:

Descripción:

Se considera la pila de 50 [m] de base, 10 [m] de altura y talud 1:1 (Figura 3.2-1), con la generación de calor mayor, generación tipo B (Figura 3.2-5).

La convección interior se produce debido al campo de velocidad generado por la Ley de Darcy, para una tasa de irrigación de 5 [L/hm²].

Como fenómenos de contornos se consideran las características nombradas en el caso anterior para la pila cubierta y la pila descubierta junto a elevar la temperatura de irrigación a 301,15 [K].

En este caso se acopla un nuevo fenómeno, la difusión de oxígeno en la pila, esta se caracteriza por un consumo de oxígeno debido a las reacciones internas, consumo que se modela según lo presentado en las ecuaciones 2.28 - 2.30.

Parámetros de entrada:

- Propiedades térmicas de la pila
- Campo de velocidad dado por la Ley de Darcy
- Temperatura inicial de la pila: 291,15 [K] = 18 [°C]
- Concentración inicial de oxígeno: 0,272 [Kg/m³] = 8,5003 [mol/m³]
- Presión absoluta: 1 [atm]

Condiciones de borde y en el dominio:

$\partial\Omega$:

- a) Generación de calor volumétrica por reacciones biológicas (Generación de calor, tipo B), según la Figura 3.2-5
- b) Consumo de oxígeno según las ecuaciones 2.28 – 2.30 y las presentadas en el capítulo 2.4.4 Módulo –Transporte de especies diluidas.

En la siguiente tabla se muestran los datos efectivos utilizados para el consumo de oxígeno y para el transporte de oxígeno en la pila.

Tabla 3.2.14: Datos para el consumo de oxígeno

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
A_c	2,25E+05	[m ³ /(kg*s)]	Factor Pre-Exp. De Activación
ρ_s	1700	[kg/m ³]	Densidad del material
E_c	1E+05	[J/mol]	Energía de Activación
$C_{ox,i}$	0,272	[kg/m ³]	Concentración de oxígeno
D_e	5,5E-7	[m ² /s]	Coefficiente de difusión efectivo
M_{ox}	0,0319988	[kg/mol]	Masa molar del oxígeno

Cabe notar que los resultados de concentración de oxígeno en el medio son presentados en [mol/m³], por lo cual los parámetros anteriores que tengan unidades en [kg] deben ser ponderados por la masa molar (M_{ox}).

Γ^i :

- a) Convección forzada del aire a la temperatura ambiente y velocidad del viento de la zona escogida, con un coeficiente convectivo de $\frac{1}{4}$ del presentado en la Figura 3.2-11
- b) Radiación solar incidente, según la Figura 3.2-8. Absortividad = 0,5.
- c) Radiación emitida por la pila, según la ecuación 3.4, y la temperatura ambiente, Figura 3.2-9 Emisividad = 0,3.
- d) Evaporación, según la ecuación 3.5, y humedad relativa del 100%.
- e) Calor aportado por fluido de irrigación, según la ecuación 3.1, con una temperatura de entrada de 301,15 [K] (28 [°C]).

Γ^l, Γ^r :

- a) Radiación solar incidente, definida para el contorno superior pero multiplicada por un factor de pérdida, asociada a inclinación y orientación, del 50%.
- b) Convección forzada del aire, definida para el contorno superior.
- c) Radiación emitida por la pila, definida para el contorno superior.

Γ^0 : Aislamiento térmico.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE CASOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos desde las simulaciones termo-fluidodinámicas realizadas en el software Comsol Multiphysics.

Cada caso se realiza en estado transiente con pasos de tiempo de 86400 [seg] (1 día) para un tiempo total de $3,15 \cdot 10^7$ [seg] (1 año).

En primer lugar se presentan los resultados para la Ley de Darcy, los cuales son idénticos mientras no varíe la tasa de irrigación. (Caso 3: Efecto de la tasa de irrigación)

Los resultados presentados para la transferencia de calor en cada caso variarán dependiendo del punto de interés de este.

Se definen 5 puntos de evaluación, del 3 al 7 desde abajo hacia arriba, según la siguiente figura.

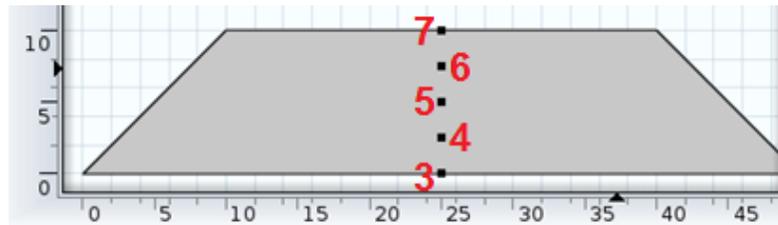


Figura 3.2-1: Puntos de evaluación en la pila

Los puntos son equidistantes:

- Punto 7, contorno superior. $y = \text{Altura total (H)}$.
- Punto 6. $y = 0,75 \cdot H$
- Punto 5, $y = 0,5 \cdot H$
- Punto 4, $y = 0,25 \cdot H$
- Punto 3, contorno inferior, $y = 0$.

En los puntos de evaluación se calcula la temperatura en función del tiempo, la generación de calor en función del tiempo, entre otras.

4.1 Ley de Darcy:

Los campos de presión y velocidad presentados dependen en gran medida de la tasa de irrigación, en todos los casos se utiliza una tasa de 5 [L/h/m²], salvo en el caso 3 (Efecto de la tasa de irrigación), obteniéndose los siguientes contornos.

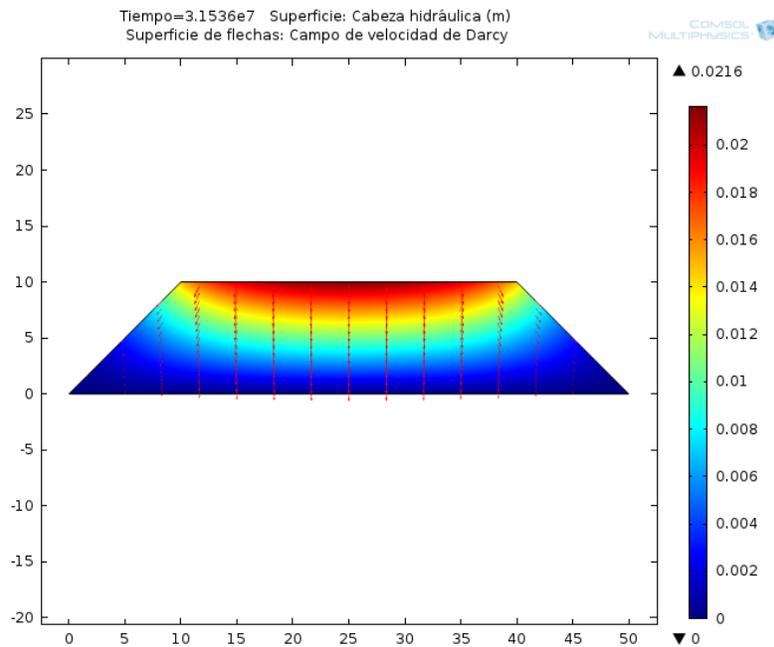


Figura 4.1-1: Contorno de carga hidráulica total [m]

La figura anterior muestra una superficie de flechas que corresponde a la dirección del movimiento del fluido y el contorno de la carga hidráulica total, la cual nace a partir de la ecuación de Bernoulli, presentada a continuación:

$$H = z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2g} \quad (4.1)$$

Dónde:

H : Carga hidráulica total [m]

z : Altura geométrica [m]

p : Presión [Pa]

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

g : Gravedad [m/s²]

v : Velocidad del fluido [m/s]

De lo anterior, el aporte por velocidad del fluido es mínimo, dado que al considerar un tasa de irrigación de 5 [L/h/m²], se tiene una velocidad en el contorno superior de $1,388 \times 10^{-6}$ [m/s], lo cual al elevarlo al cuadrado y dividirlo por $2g$ se obtiene aproximadamente, $9,8 \times 10^{-14}$ [m], siendo despreciable.

El segundo término del lado derecho corresponde al aporte por la presión (p [Pa]) del sistema, aporte que puede apreciarse en la siguiente figura.

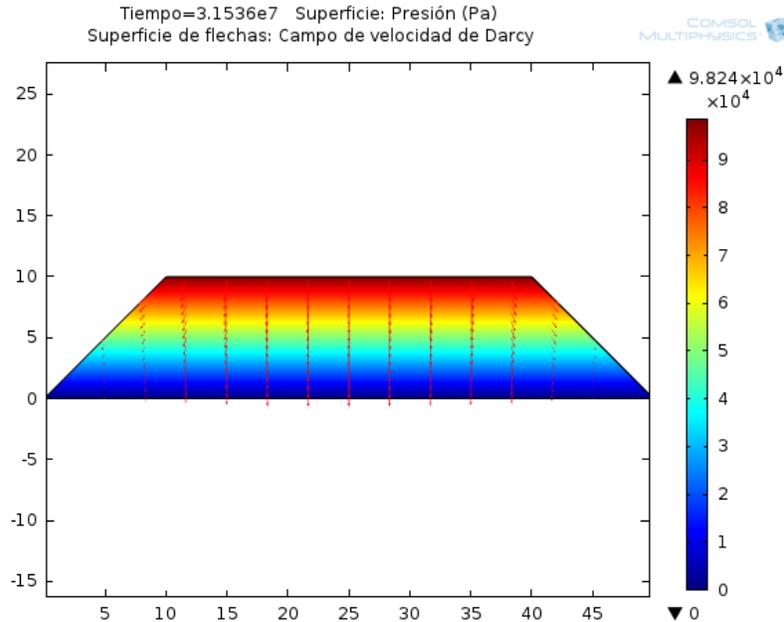


Figura 4.1-2: Campo de presión. Tasa de irrigación 5 [L/h/m²]

Y en su forma como cabeza de presión:

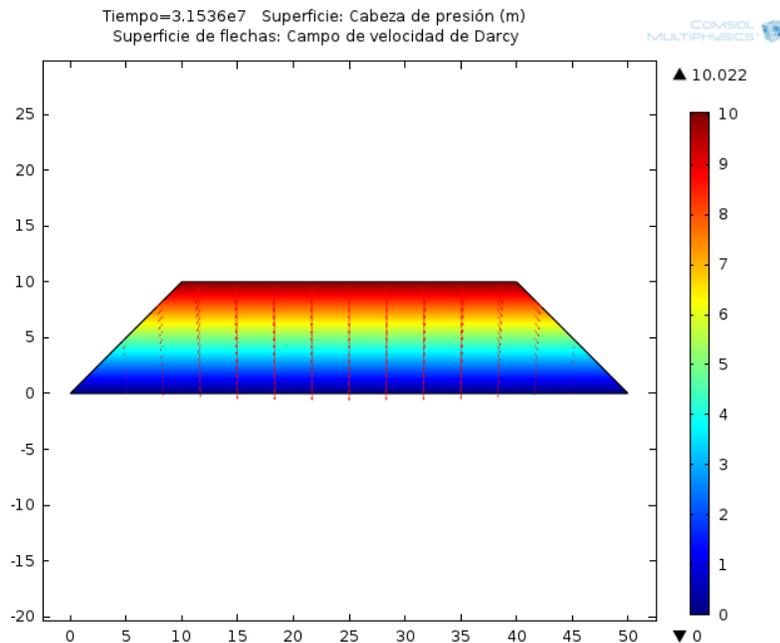


Figura 4.1-3: Contorno de altura de presión [m]

Por último se considera el aporte de presión por la “Altura geométrica” (z [m]) la cual va de 0 [m] en la base, hasta los 10 [m] en el tope de la pila. Debido al manejo del software, el contorno de altura geométrica se observa como sigue.

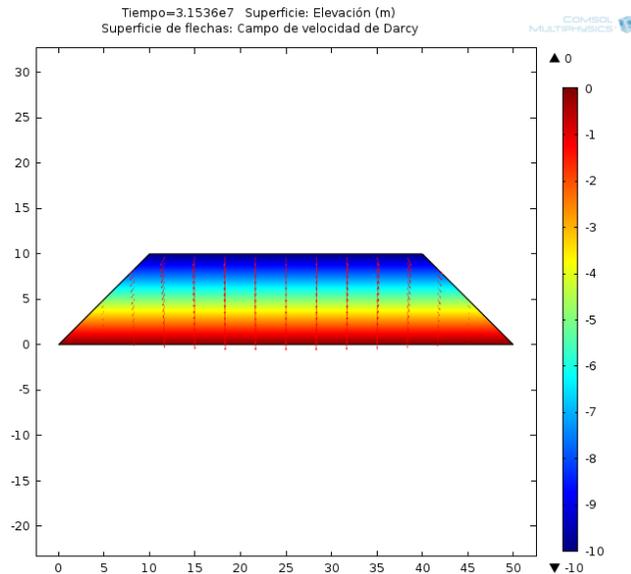


Figura 4.1-4: Contorno de altura geométrica [m]

A pesar de que el contorno superior se considere negativo, lo importante son las diferencias en el gradiente hidráulico, las cuales provocan el movimiento del fluido en un medio poroso.

Así finalmente se obtiene la presión total que genera el flujo al interior de la pila, la carga hidráulica total (H [m]) de la Figura 4.1-1.

Cabe notar que las presiones presentadas se desarrollan a partir de las condiciones de borde del problema, con una presión de 0 [Pa] en el borde inferior y la tasa de irrigación en el borde superior.

Las condiciones de contorno fueron escogidas con el fin de mantener diferencias de carga hidráulica en la pila, simulando así el flujo a través de la pila.

Con el fin de conocer el campo de velocidad, se ha utilizado la Ley de Darcy, la cual en su forma general dice: “La velocidad media del agua a través de una sección macroscópica de suelo es proporcional al gradiente hidráulico”.

Esta ley se ha presentado en el capítulo 2.4.2 Modulo – Ley de darcy, y en su forma generalizada para flujos bifásicos en el capítulo 2.3.2 Ecuaciones de flujo multifásico.

La ley de Darcy es válida cuando se cumple [32]:

- A) Medio poroso continuo, homogéneo e isótropo
- B) Medio saturado en fluido

C) Fuerzas inerciales despreciables respecto a las fuerzas de velocidad (flujo laminar)

La primera condición es ampliamente utilizada para el estudio de medios porosos, [14, 15, 16, 17, 18]. Esta corresponde al ideal en pilas de lixiviación con el fin de asegurar una buena infiltración de la solución lixivante, y dependerá de las características de aglomeración en los momentos previos y durante la carga de la pila.

La segunda condición se asume en este trabajo para simplificar el cálculo del campo de velocidad, en la realidad esta condición solo se cumple en escalas de laboratorio donde se puede saturar el medio con fluido.

Para lograr campos de velocidad más realistas se deben considerar las "Ecuaciones de flujo multifásico" (en el capítulo 2.3.2), donde se presenta una ley generalizada de Darcy en la cual se consideran 2 fases fluidas, aire y líquido, con saturación variable.

La tercera condición, de flujo laminar, es común en medios porosos. Los primeros estudios consideraban que el número de Reynolds (Re) debía ser menor a 1, luego varios investigadores han notado que el número de Reynolds se debe mantener entre 1 y 10, para lograr flujo laminar. [32,33]

Angel (1989) [34] propuso un valor límite superior de 20 para el número de Reynolds, donde se cumple la Ley de Darcy.

Considerando el número de Reynolds como:

$$Re = \frac{v \cdot D_e \cdot \rho}{\mu} \quad (4.2)$$

Dónde:

v : Velocidad característica del fluido [m/s]

D_e : Diámetro equivalente a las partículas [m]

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]

μ : Viscosidad dinámica del fluido [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

Si se toman valores a 20 [°C] para el agua, se tiene ρ : 999,62 [kg/m^3] y μ : 0,001 [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]. No se tiene un dato exacto del diámetro equivalente del medio, pero asumiendo un valor de 1 [mm] típico de arena mediana, y una velocidad $2,5 \cdot 10^{-3}$ [m/s], la cual es suficientemente conservadora para el problema tratado, se tiene un número de Reynolds de 2,5 por lo cual la condición de flujo laminar se cumple.

El campo de velocidad de Darcy obtenido se presenta en la siguiente figura.

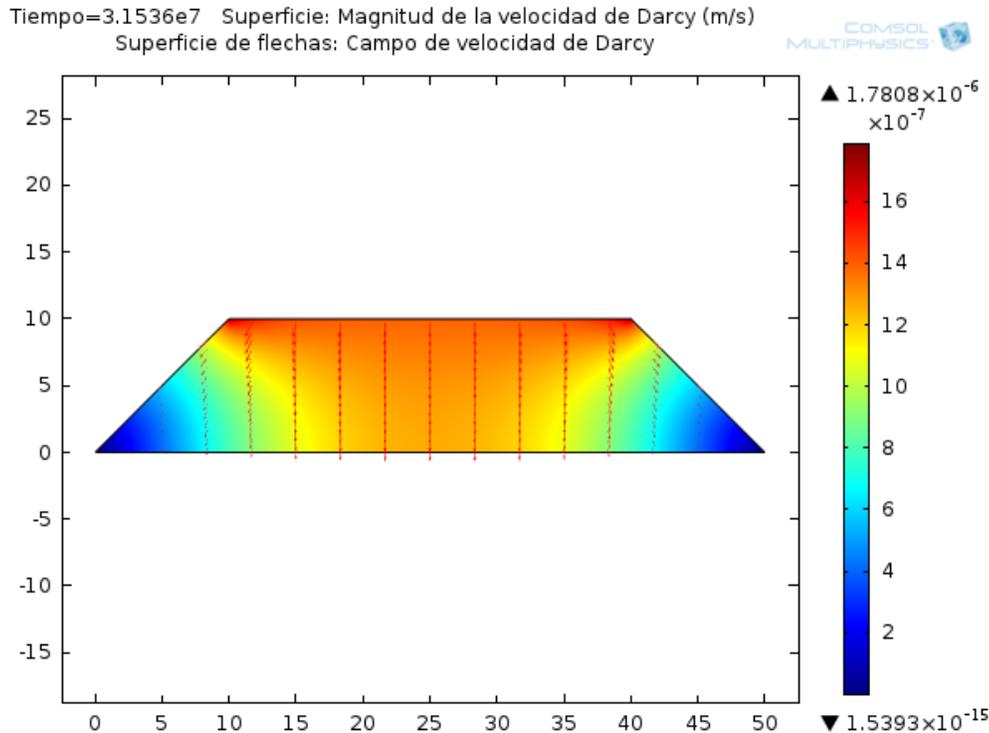


Figura 4.1-5: Campo de velocidad. Tasa de irrigación 5 [L/h/m²]

La superficie de flechas muestra la dirección del flujo, siendo la dirección “-Y” la preferente del sistema. El centro de la pila mantiene las velocidades más altas mientras el fluido desciende.

La velocidad de Darcy máxima es de $1,78 \times 10^{-6}$ [m/s], la promedio es de $1,075 \times 10^{-6}$ [m/s], mientras que en el centro de la pila es de $1,296 \times 10^{-6}$ [m/s].

Las velocidades alcanzadas confirman la suposición de flujo laminar considerada en el modelo.

Si se deseara cronometrar el tiempo que tarda el fluido en llegar a la base de la pila, se observarían diferencias con respecto a lo anterior debido al efecto de la tortuosidad, la cual depende del tipo de material apilado. La tortuosidad presenta dificultades para el flujo lineal.

En el campo de velocidad presentado se observa que en los bordes inferiores se alcanzan velocidades considerablemente más bajas que en el resto del sistema, lo cual provocará una menor irrigación en aquellas zonas disminuyendo la lixiviación del mineral.

La conductividad hidráulica con la cual se genera el campo de velocidad de Darcy, es de $6,0506 \times 10^{-4}$ [m/s], en toda la pila, este valor es el factor de proporcionalidad entre la velocidad media y el gradiente hidráulico, el cual representa la facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él.

Ambos contornos presentados, de presión y velocidad, son independientes del tiempo de simulación, esto debido a la consideración de saturación en fluido del sistema

dado por la Ley de Darcy, es decir, al entrar líquido por el borde superior comenzará a desplazar el fluido ya existente en el sistema generando, casi instantáneamente, los contornos de presión y velocidad expuestos.

Para contrastar los valores obtenidos se ha buscado en diversos estudios que tratan el tema de flujo en medios porosos con y sin de transferencia de calor.

En Dixon 2000 [31], se considera un modelo de transferencia de calor en 1D en el cual la velocidad del fluido de irrigación al interior del sistema se mantiene constante en 5 [kg/m²h], es decir, $1,388 \cdot 10^{-6}$ [m/s], tomando una densidad de 1000 [kg/m³]. Así mismo la velocidad de Darcy presentada en Leahy [19] es de $1,35 \cdot 10^{-6}$ [m/s], nuevamente Leahy [21] en un estudio del efecto de la aireación toma una velocidad constante del fluido de irrigación al interior de la pila de $1,4 \cdot 10^{-6}$ [m/s]. En estos casos presentados se considera aireación e irrigación haciendo simplificaciones según la prioridad del estudio, entre ellas, suponiendo velocidades constantes al interior de la pila para el fluido de irrigación.

A continuación se presentan parte de los resultados del estudio de Alvear, Zambra y Maldonado [22] el cual considera la ecuación de richards (ecuación 2.8-2.10) para determinar el contenido de fluido en la pila, es decir, no considera la presencia de aire en el medio pero sí un campo de fluido variablemente saturado.

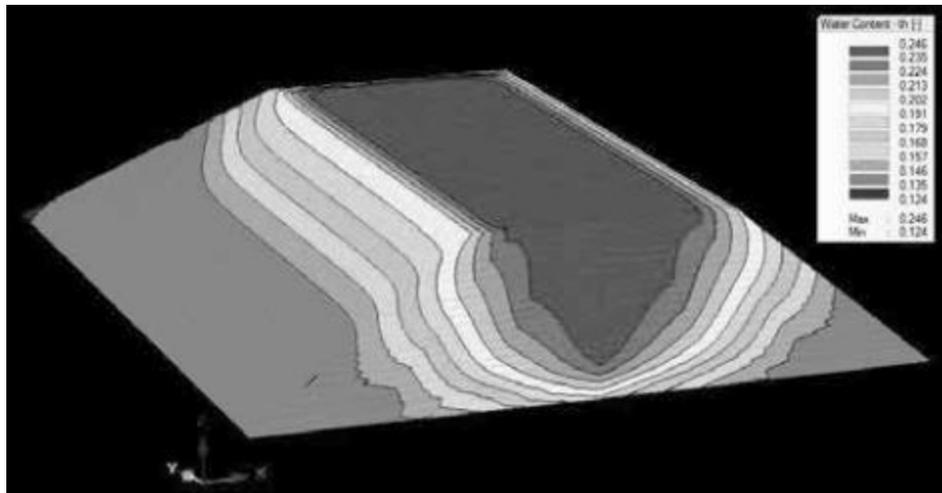


Figura 4.1-6: Distribución del contenido de agua luego de 15 días de riego [22]

La pila mostrada tiene una altura de 5,5 [m], dado que el fluido demora 15 días en llegar a la base se tiene una velocidad de $4,243 \cdot 10^{-6}$ [m/s] la cual es mayor a la presentada en este estudio.

Se puede observar como los bordes de la pila tienen una lenta irrigación, lo cual también se observa en el campo de velocidad de darcy de la Figura 4.1-5.

Por último, siendo el campo de velocidad en estado saturado una simplificación del caso real, es posible considerarlo como referencia para conocer el comportamiento

térmico de la pila, aunque esta velocidad afectará la convección interna del sistema, se mantendrán los fenómenos generales del estudio.

En el capítulo 4.2.4. Caso 3 - Efecto de la tasa de irrigación, se estudia la influencia del campo de velocidad en la temperatura del sistema manteniendo un tipo de generación de calor, y además se muestra como debe variar la generación de calor para mantener un campo de temperatura al interior de la pila.

4.2 Transferencia de Calor:

Se presentan los resultados para cada caso descrito en la metodología específica, capítulo 3.2.4, Definición de casos de estudio.

4.2.1 Caso 1 - Contraste para diferentes generaciones de calor:

Para este primer caso se buscan datos de la literatura para las ecuaciones de generaciones de calor dadas por Zambra, entre otros autores [16, 17, 20]. Con estos datos se obtienen campos de temperatura al interior de la pila, la temperatura promedio y la generación de calor promedio en la pila.

En primer lugar se presentan los contornos de temperatura obtenidos en la pila para diferentes tiempos de simulación.

Para lograr una correcta interpretación de las figuras se debe poner atención al eje de referencia el cual presenta las temperaturas en grados Kelvin ([K]), además los colores blancos representan temperaturas más altas.

Tiempo 86400 [seg] (1 día):

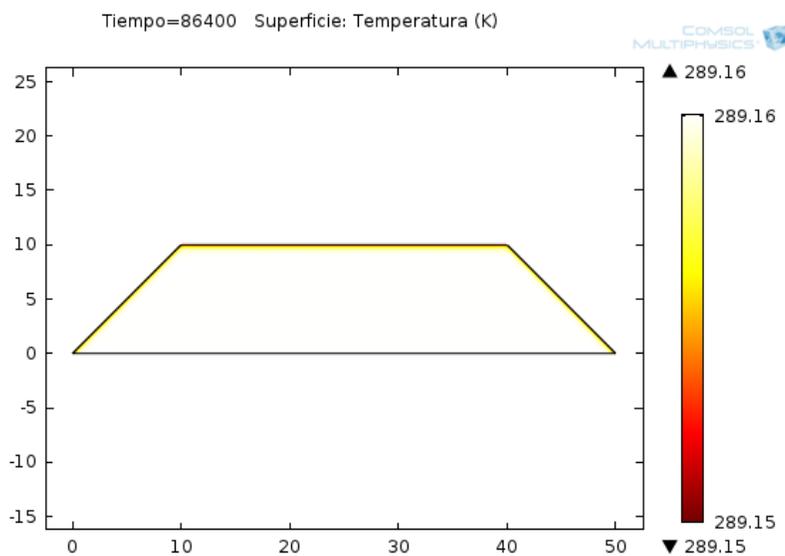


Figura 4.2-1: Caso 1 - Contorno temperatura día 1

Tiempo 4.4064×10^6 [seg] (51 días)

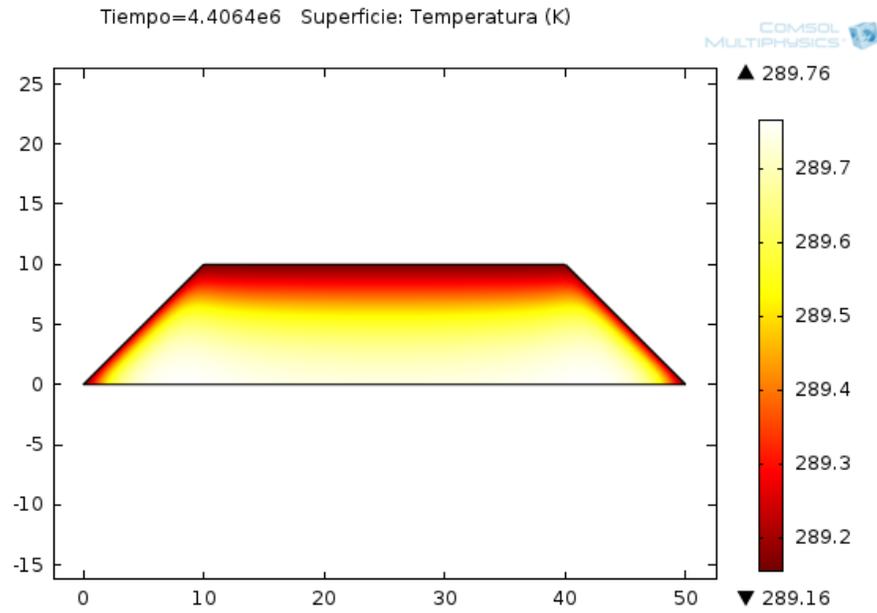


Figura 4.2-2: Caso 1 - Contorno de temperatura día 51

Tiempo 8.7264×10^6 [seg] (101 días)

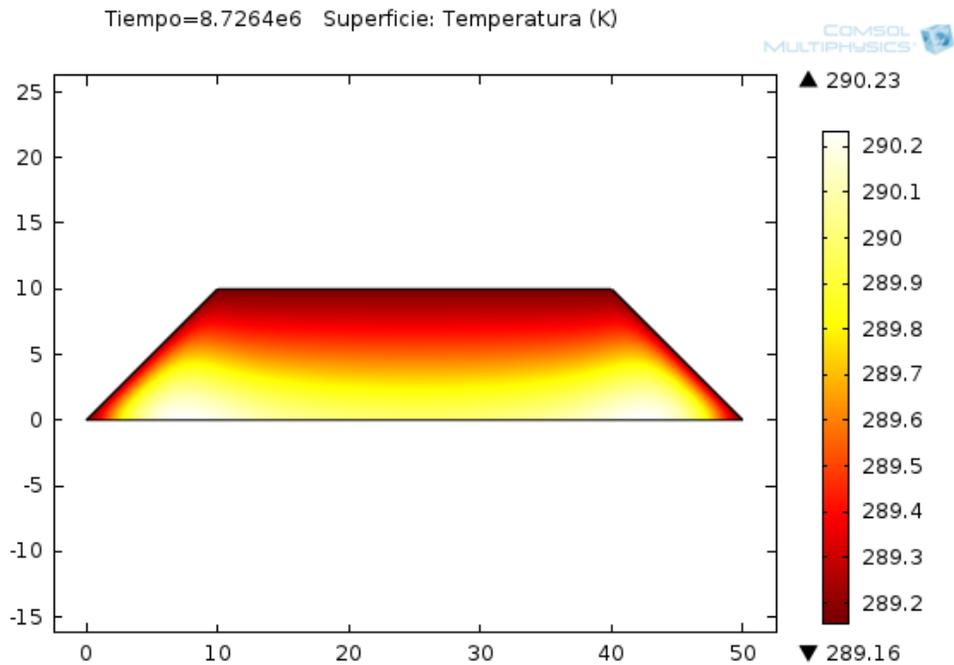


Figura 4.2-3: Caso 1 - Contorno temperatura día 101

Tiempo 1.73664×10^7 [seg] (201 días)

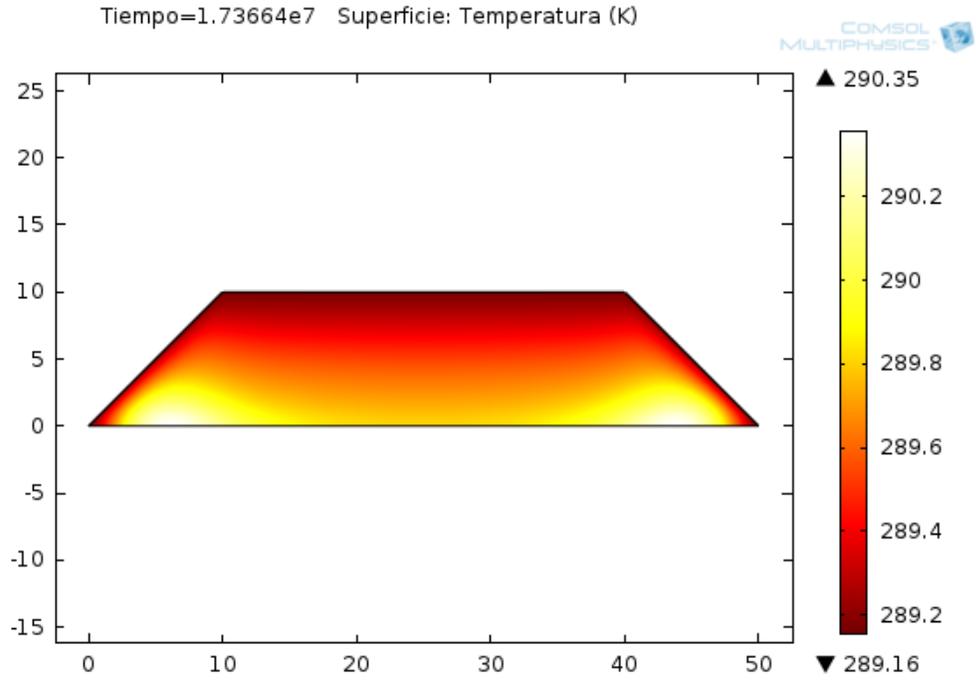


Figura 4.2-4: Caso 1- Contorno temperatura día 201

Tiempo 2.60064×10^7 [seg] (301 días)

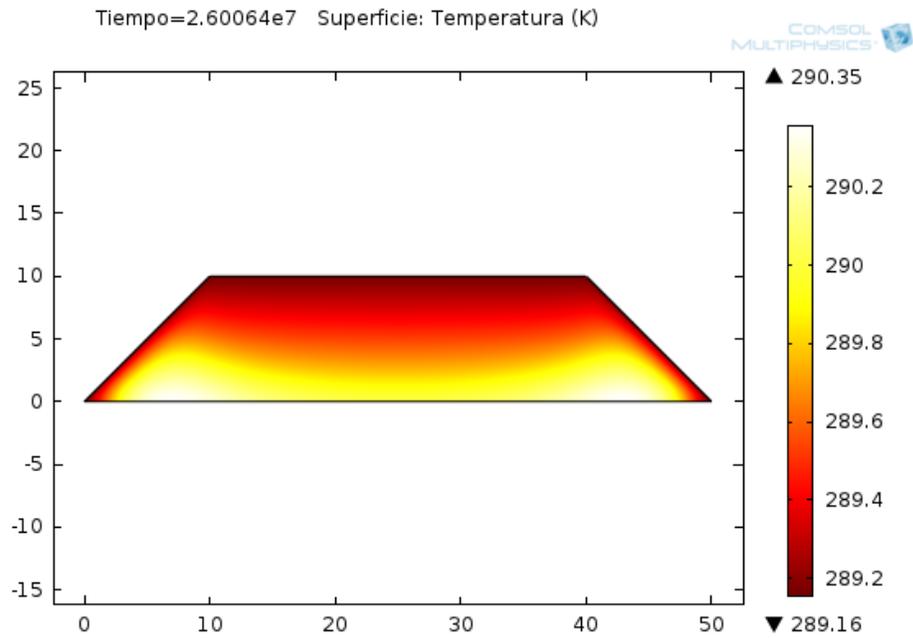


Figura 4.2-5: Caso 1 - Contorno temperatura día 301

Tiempo 3.1536×10^7 [seg] (365 días)

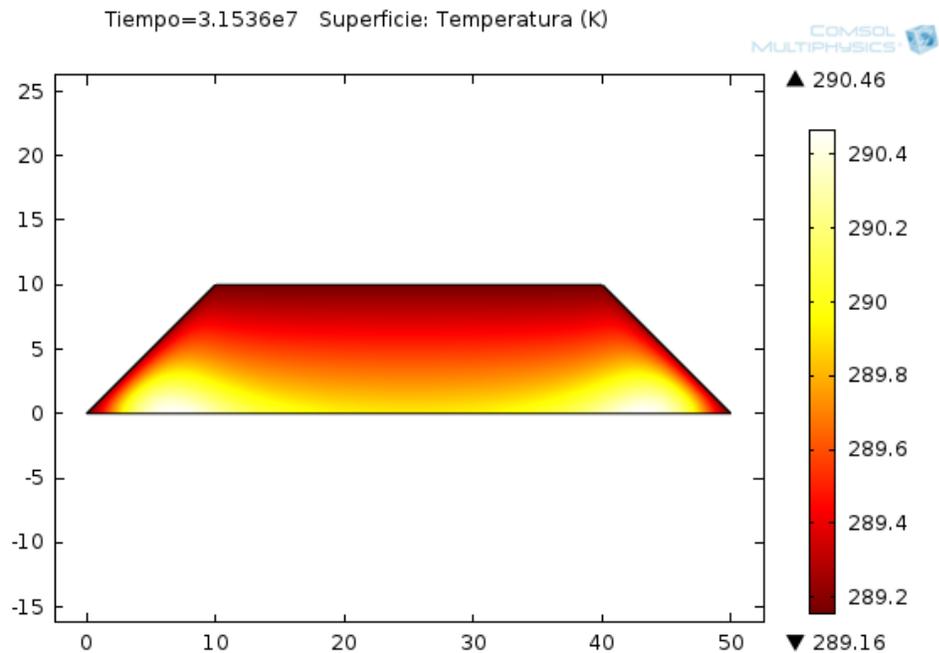


Figura 4.2-6: Caso 1- Contorno temperatura día 365

Los contornos anteriores muestran el leve, casi nulo, aumento de temperatura logrado con la generación de calor utilizada, generación tipo A presentada en la Figura 3.2-4, esto debido a que la generación de calor para temperaturas entre 289,15 [K] y 290,46 [K] es insuficiente para elevar la temperatura.

Es posible notar el efecto de la condición de borde, la convección del viento a 2 [m/s] y a 289,15 [K], la cual mantiene todos los bordes a 289,16 [K].

Por otro lado se observa como la temperatura aumenta hacia el interior de la pila, lo cual se produce por la mayor dificultad en la difusión de calor hacia los bordes, además del fenómeno convectivo interior producido por el fluido de irrigación, el cual “arrastra” el calor.

Los 2 “puntos calientes” observados en la zona baja, se produce principalmente por la convección interior, como se observa en el contorno de velocidad de Darcy (Figura 4.1-5) esta zona presenta velocidades más bajas que en el centro, por lo cual existe un menor enfriamiento, además no se encuentra suficientemente cerca del borde para difundir el calor como sí sucede en los extremos que a pesar de tener velocidades aún más bajas, presentan pérdida de calor disminuyendo su temperatura.

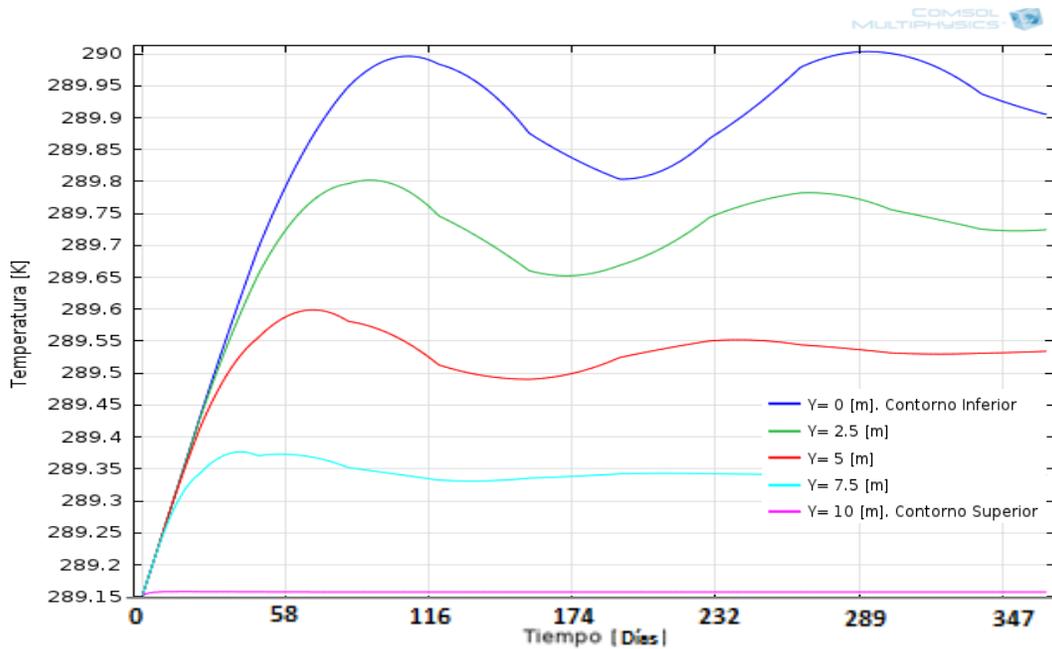


Figura 4.2-7: Caso 1- Temperatura en 5 puntos centrales para el tiempo de simulación

La figura anterior muestra las temperaturas alcanzadas en los 5 puntos de evaluación en el centro de la pila, muestra, además, como aumentan las temperaturas hacia el interior de la pila y como estas se comportan en el tiempo de evaluación.

El punto “y = 10 [m]” (rosado) es el borde superior de la pila en el cual se observa un aumento despreciable desde 289,15 [K] a 289,16 [K]. El punto “y = 0 [m]” (azul) es el punto más bajo de la pila, el cual alcanza una mayor temperatura, alrededor de 290 [K], por las razones ya nombradas.

Se observa una variación anual la cual se considera despreciable, por ejemplo, para el borde inferior (azul) la temperatura varía entre los 290 [K] a los 116 días (10^7 [seg]) y los 289,8 [K] a los 190 días, aproximadamente.

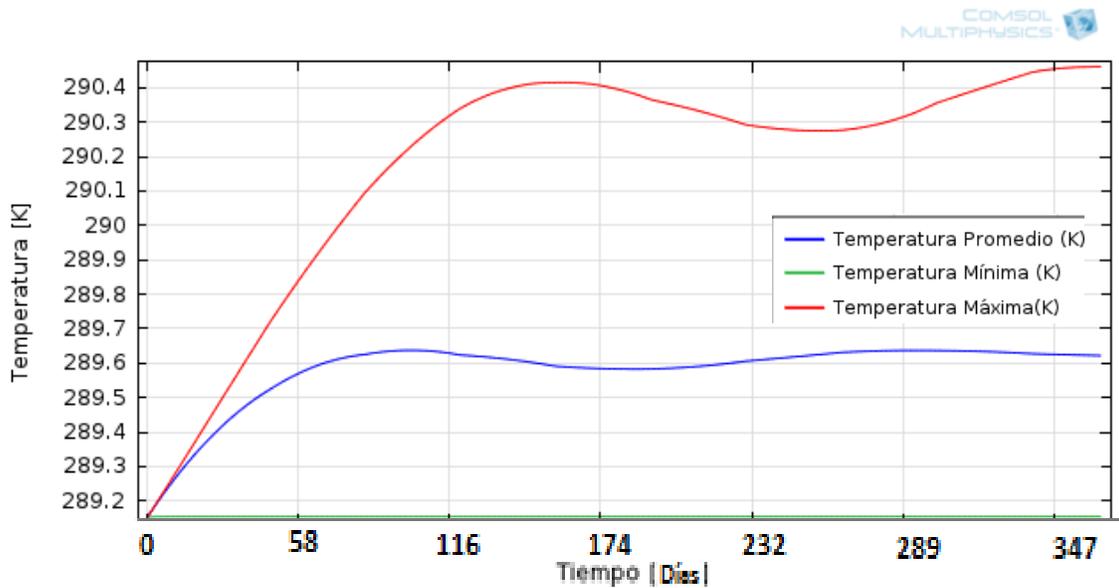


Figura 4.2-8: Caso 1- Temperaturas promedio, mínima y máxima en la pila

Se observa la temperatura promedio alcanzada en la pila, alrededor de 289.6 [K], la temperatura máxima correspondiente a los “puntos calientes” y la temperatura mínima, correspondiente a los bordes del sistema. Además se ve el tiempo de convergencia del sistema, alrededor de los 58 días para la temperatura promedio.

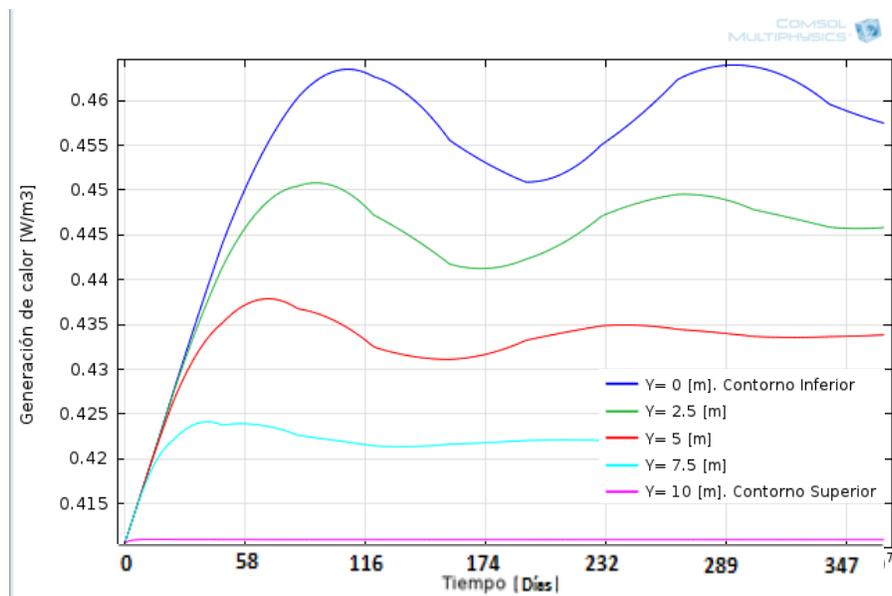


Figura 4.2-9: Caso 1- generación de calor en los puntos de evaluación

La generación de calor en los puntos de evaluación sigue la misma tendencia que la temperatura, esto debido a que nunca se logra la generación de calor máxima, que para la función utilizada es alrededor de 9 [W/m³] a los 318 [K]. Se observa las insuficientes generaciones logradas debido a la baja temperatura alcanzada por la pila.

Debido a las bajas temperaturas logradas con la primera generación de calor utilizada (generación tipo A), se decide comparar 4 generaciones de calor estimadas con el fin de lograr mayores temperaturas que permitan alcanzar las temperaturas reportadas en otros estudios [16, 28, 29], además se desea escoger alguna que presente facilidades para observar la influencia de los demás efectos estudiados.

Las generaciones de calor estudiadas son múltiplos de la presentada en la Figura 3.2-5 (generación tipo B, cuyo máximo se da cercano a los 306 [K]), estas son:

- A.- 1/9 de la Generación tipo B. Generación Máxima: 9 [W/m³]
- B.- 1/3 de la Generación tipo B. Generación Máxima: 27 [W/m³]
- C.- Generación tipo B. Generación Máxima: 81 [W/m³]
- D.- 1,5 veces la Generación tipo B. Generación Máxima: 121 [W/m³]

Se compararan las temperaturas promedios y las generaciones de calor promedio obtenidas con estas funciones de generación.

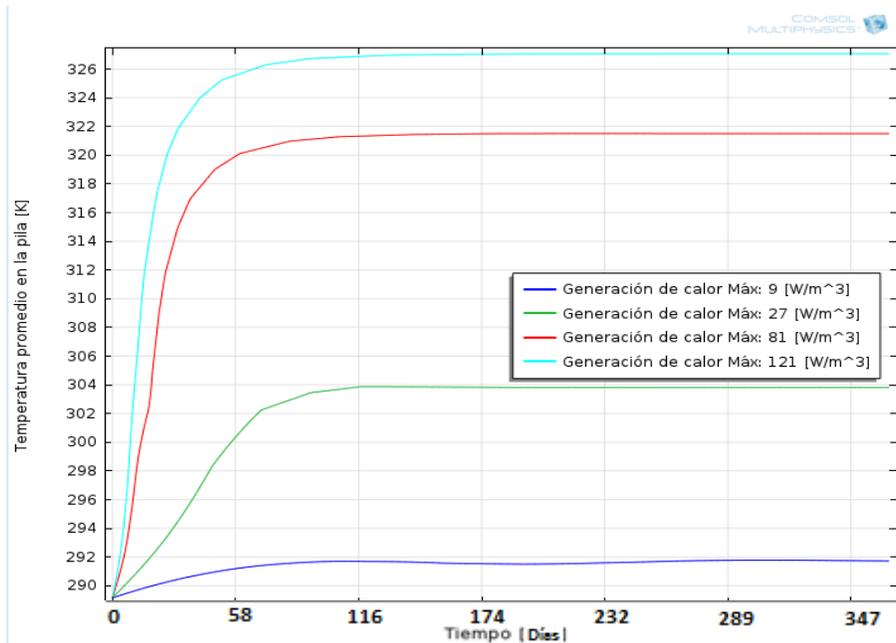


Figura 4.2-10: Caso 1- Comparación temperaturas promedios alcanzadas

A mayor generación de calor posible se alcanzan mayores temperaturas promedios. Dado lo reportado en diversos estudios, [16, 28, 29], se consideran de mayor interés las temperaturas promedios de 321,5 [K] (rojo) y de 327 [K] (celeste).

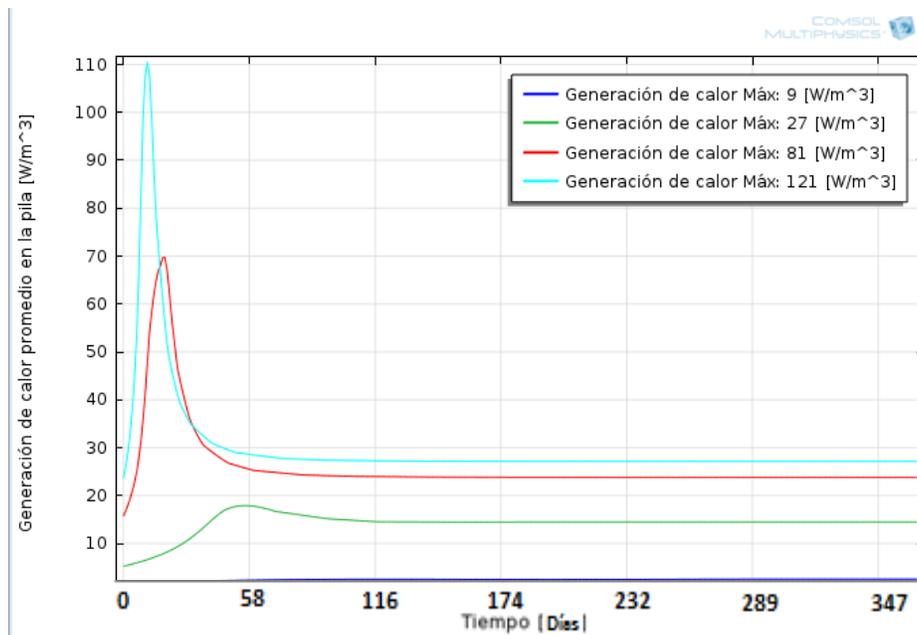


Figura 4.2-11: Caso 1-Comparación generaciones de calor promedio alcanzadas

En la figura anterior se observa la generación de calor promedio alcanzada en la pila, la curva roja y celeste presenta peaks muy marcados para luego descender a generaciones constantes bastante más bajas.

Los peaks son productos de la función generación de calor (Figura 3.2-5), la cual es tiene su máximo cercana a los 306 [K], temperatura que es alcanzada rápidamente por la pila, alrededor del día 25. Los peaks representan la dependencia de las reacciones biológicas internas, las cuales son muy sensibles a la temperatura.

Mientras desciende la generación de calor sigue aumentando la temperatura al interior de la pila, aunque más lentamente, luego se alcanza un estado de equilibrio donde la generación de calor se iguala a la disipación de calor.

Para escoger la generación a utilizar en el trabajo se tomaron algunas consideraciones como, que la temperatura alcanzada se mantenga en rangos realistas para el proceso, que la generación de calor alcanzada se encuentre entre la utilizada por otros autores y la facilidad de observar los fenómenos que se estudiaran a continuación.

Para obtener una generación de calor realista se debiesen considerar las tasas de oxidación del mineral, las cuales dependen de diversos parámetros químicos y físicos, además de las entalpías para cada reacción del proceso, también se debiese considerar el crecimiento de los microorganismos al interior, entre otros.

Se debe tomar en cuenta que al no tener datos reales de generación de calor, los cuales se pueden obtener de estudios experimentales, solo se puede definir una generación con la cual se logre estudiar el comportamiento térmico del sistema, lo cual es el fin de este trabajo.

Dixon 2000 [31], utiliza generaciones de calor de 10 [W/m³] y de 20 [W/m³], las cuales considera suficientes para estudiar las respuestas del sistema.

En el trabajo “*High temperature heap leaching of chalcopyrite*” [29] se presenta un estudio experimental en una columna de 6 [m] de altura y 1 [m] de diámetro, las cuales se utilizan en laboratorios para determinar condiciones de operación y recuperación de cobre. En esta columna se miden las temperaturas alcanzadas en un proceso que incluye la inoculación de bacterias a través del fluido de irrigación. Además se presenta un balance de energía obtenido.

La siguiente figura muestra la temperatura promedio alcanzada y el tipo de bacterias dominante en el tiempo de operación.

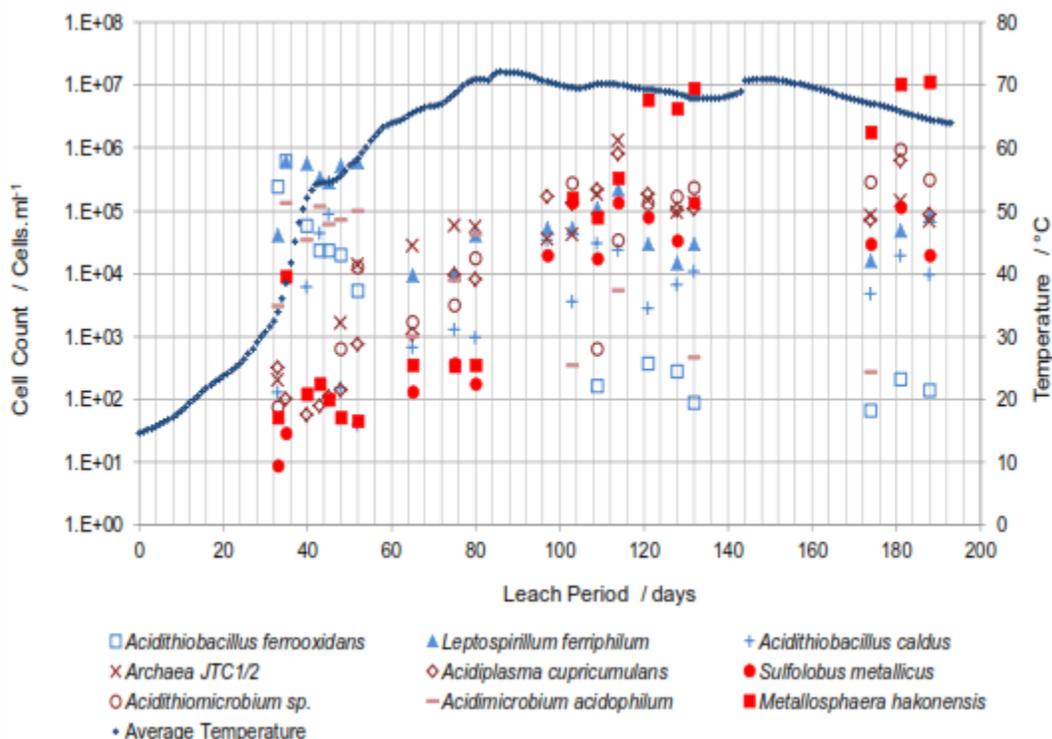


Figura 4.2-12: Sucesión de microorganismos dominantes como función del tiempo y de la temperatura del mineral [29]

Se observa que las primeras bacterias que se desarrollan son las del tipo mesófilo de baja temperatura y de mayor temperatura, como lo son la *Acidithiobacillus ferrooxidans*, la *Leptospirillum ferriphilum* y la *Acidithiobacillus caldus*, las cuales se desarrollan entre los 10 [°C] a los 52 [°C].

La temperatura mostrada es la promedio pero al interior de la columna existen diferentes temperaturas, por lo cual se desarrollan diversas cepas de bacterias a diferentes alturas, por esto en la figura anterior se observa una coexistencia de bacterias mesófilas con algunas moderadamente termófilas o termófilas extremas.

La siguiente figura muestra la estrategia de inoculación seguida.

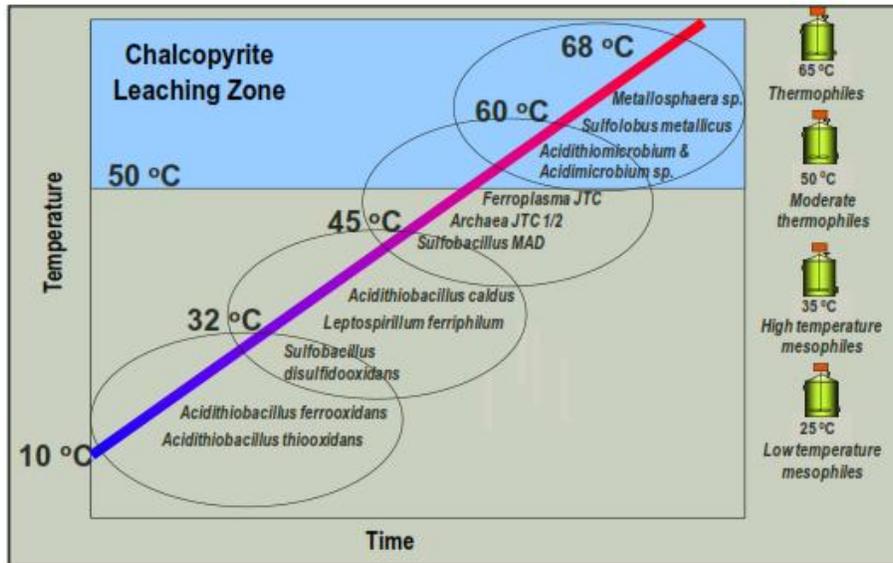


Figura 4.2-13: Estrategia de inoculación de bacterias [29]

En este estudio se presenta un balance de calor en el sistema, el cual se ve a continuación.

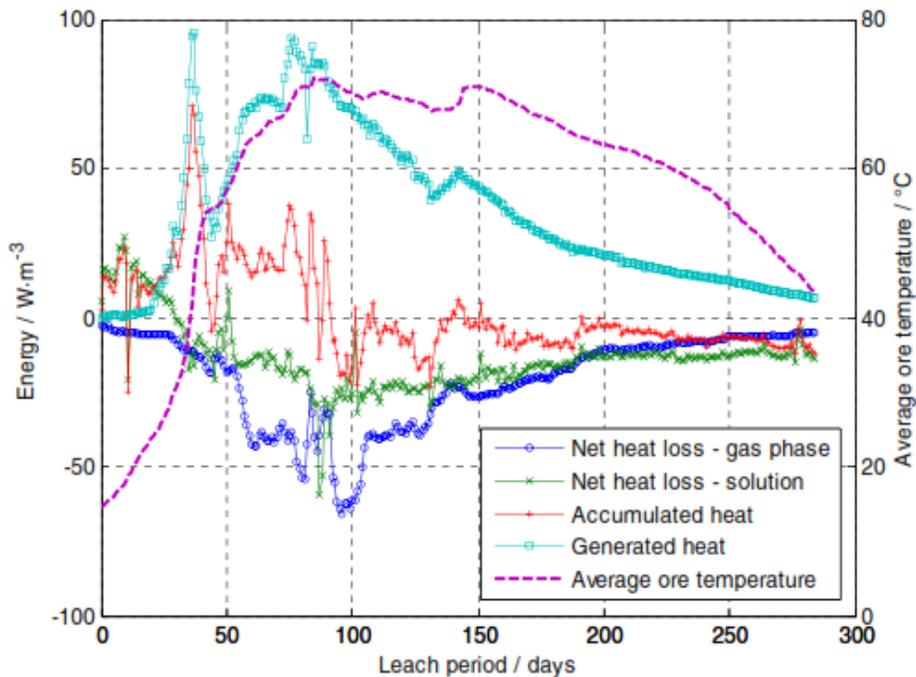


Figura 4.2-14: Temperatura promedio, tasa de generación de energía, pérdidas de calor, calor acumulado versus periodo de lixiviación en columna de lixiviación de 6 [m]. [29]

La generación de calor no logra superar los 100 [W/m³], se observa un rápido peak el cual coincide con un mayor aumento de temperatura en la Figura 4.2-12, precisamente en el tiempo cuando se reporta una mayor presencia de bacterias mesófilas, el peak tiene un rápido descenso hasta alrededor de 25 o 30 [W/m³] cercano al día 50.

Cuando se alcanza el peak la temperatura promedio bordea los 50 [°C], al descender rápidamente la generación se ve como la temperatura promedio tiende a crecer muy lentamente hasta el día 50 donde vuelve a aumentar al igual que la generación de calor la cual se mantiene sobre los 50 [W/m³] hasta, aproximadamente, el día 125, luego la generación de calor continúa disminuyendo haciendo descender la temperatura promedio.

El descenso de la generación de calor, a pesar de la inoculación de bacterias, se debe a la menor tasa de reacciones internas debido al agotamiento del mineral.

Finalmente, se puede considerar el estudio de Petersen y Dixon [28] quienes toman datos desde un estudio experimental el cual considera inoculación de bacterias en columnas de biolixiviación alcanzando temperaturas promedios de hasta 356 [K] (83 [°C]), para este estudio se reportan generaciones de calor entre 56 [W/m³] y 176 [W/m³].

Volviendo al caso 2 de este trabajo y al considerar la función de generación de calor en este caso, generación tipo B (Figura 3.2-5), se ve como esta se mantiene sobre los 20 [W/m³] entre los 290 [K] (17 [°C]) y 322 [K] (49 [°C]), siendo su máxima generación de 81 [W/m³] a los 306 [K] (33 [°C]), es decir, se encuentra en las temperaturas de operación de las bacterias mesófilas.

Al comparar la Figura 4.2-11 (Generaciones promedios para diferentes funciones de generación de calor) con la Figura 4.2-14 (Balance energético reportado), se observan ciertas similitudes entre la generación tipo B (línea roja) y el peak que alcanza la generación de calor con bacterias mesófilas, por otro lado la temperatura promedio alcanzada con la generación tipo B es de 321,5 [K] (48,5 [°C]), cercana a la observada en el balance energético del estudio experimental, cuando la generación disminuye hasta los 25 [W/m³], similar generación alcanzada en estado estacionario utilizando la generación tipo B.

Por lo presentado anteriormente se considera que la generación adecuada para este estudio será la generación tipo B, (Figura 3.2-5), línea roja en las figuras de temperatura y generación promedio de este caso, la cual presenta un máximo de generación de 81 [W/m³].

A continuación se presentan los contornos de temperatura que se logran con esta generación de calor.

Tiempo 86400 [seg] (1 día):

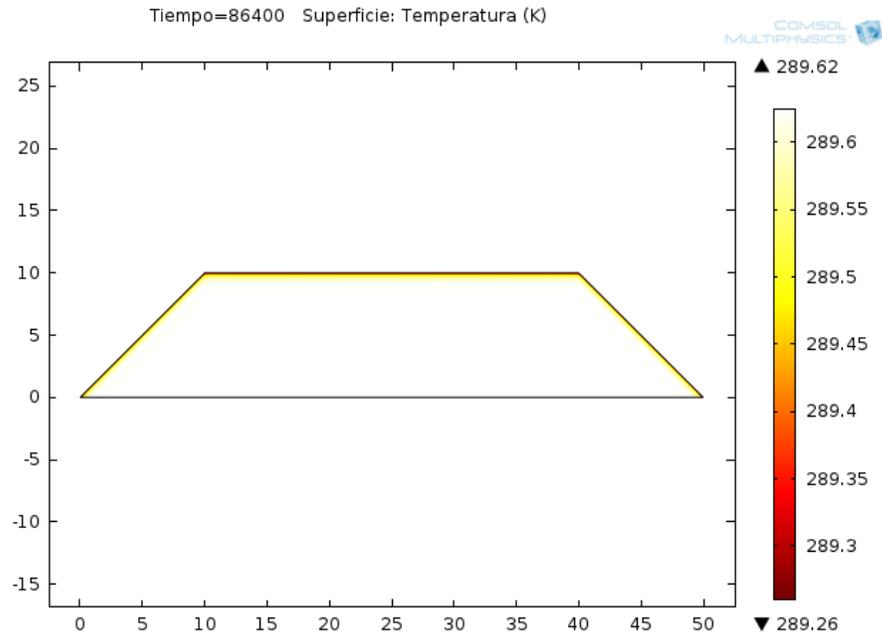


Figura 4.2-15: Caso 1 - Contorno Temperatura día 1

Tiempo $4.4064 \cdot 10^6$ [seg] (51 días)

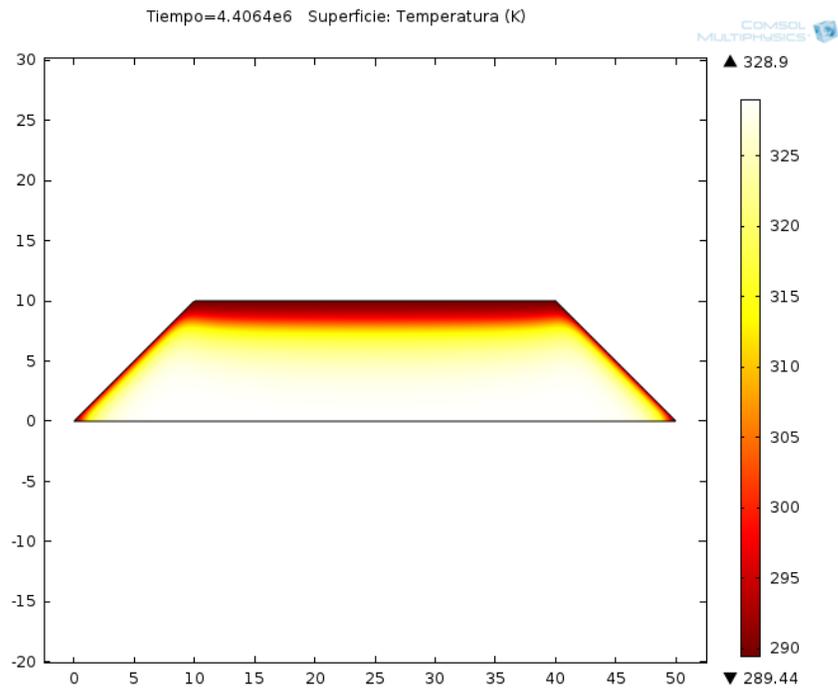


Figura 4.2-16: Caso 1 - Contorno temperatura día 51

Tiempo 8.7264×10^6 [seg] (101 días)

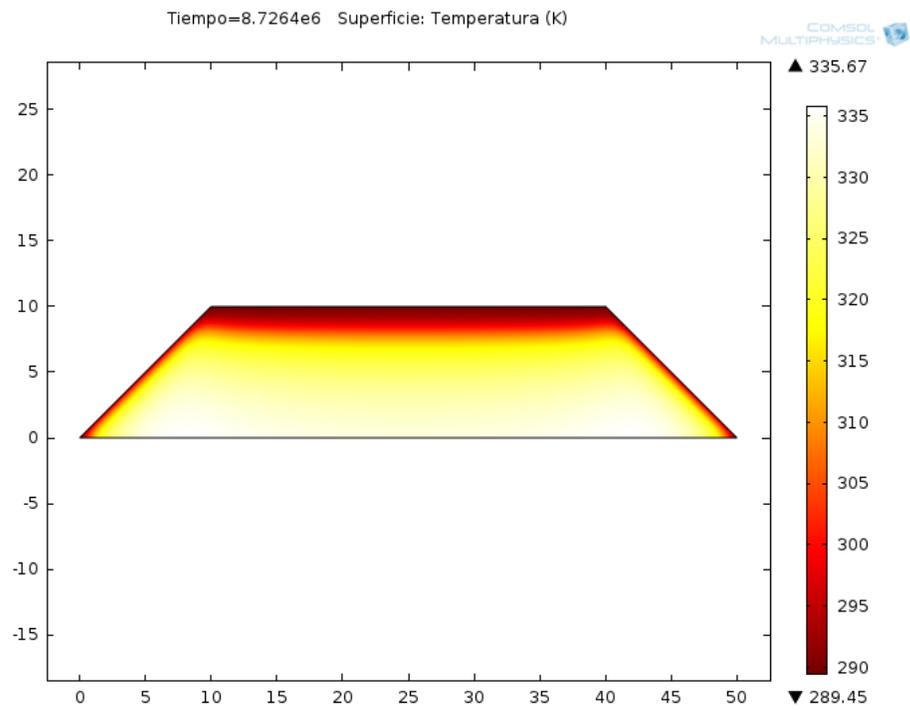


Figura 4.2-17: Caso 1 - Contorno temperatura día 101

Tiempo 1.73664×10^7 [seg] (201 días)

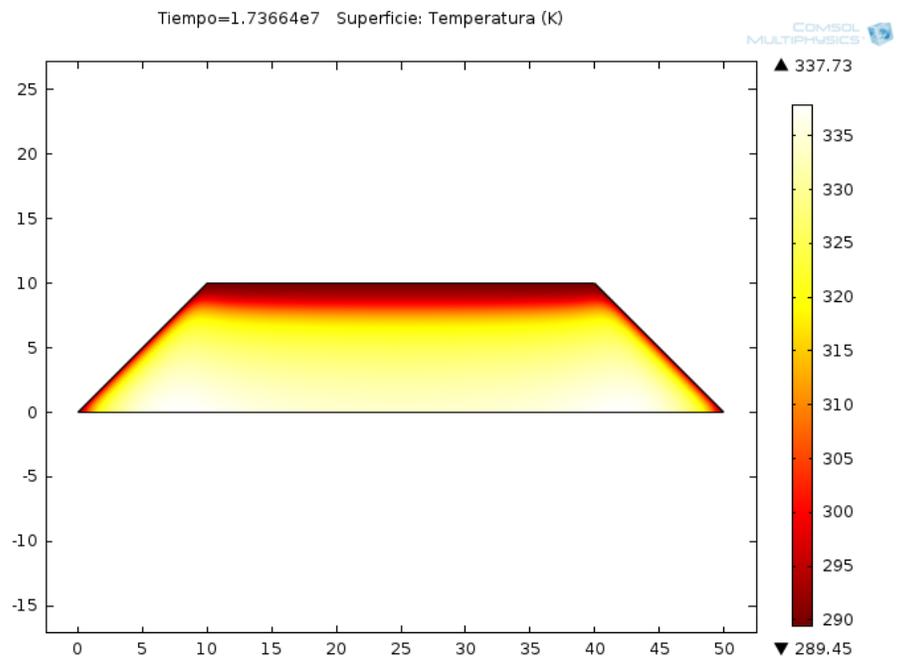


Figura 4.2-18: Caso 1 - Contorno temperatura día 201

Tiempo $2.60064 \cdot 10^7$ [seg] (301 días)

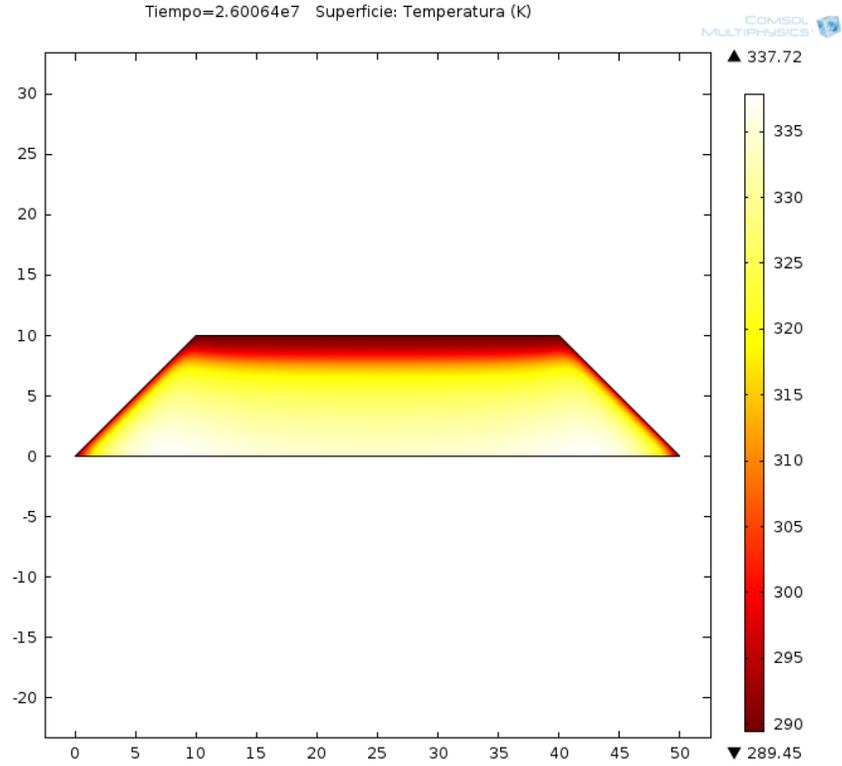


Figura 4.2-19: Caso 1- Contorno temperatura día 301

Tiempo $3.1536 \cdot 10^7$ [seg] (365 días)

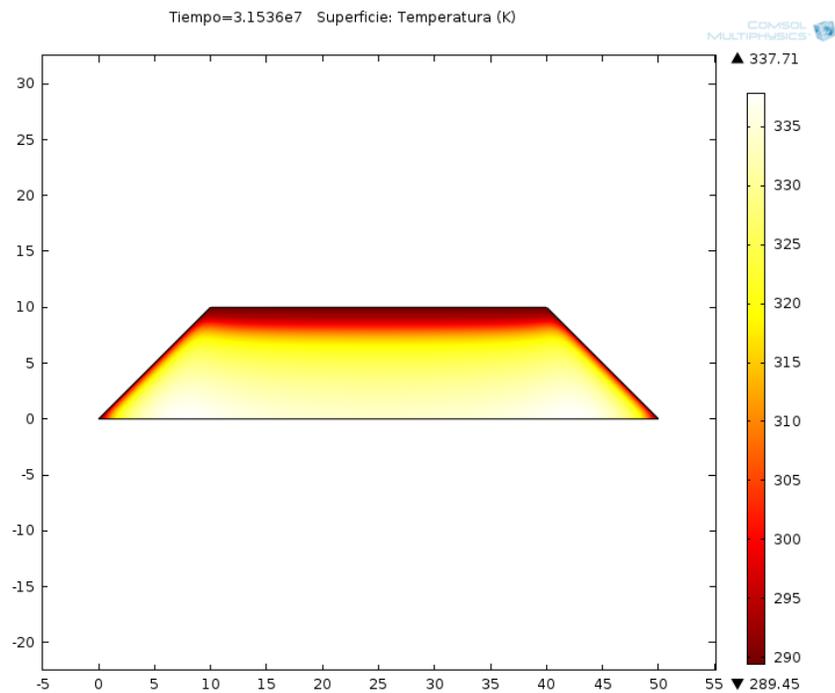


Figura 4.2-20: Caso 1 - Contorno temperatura día 365

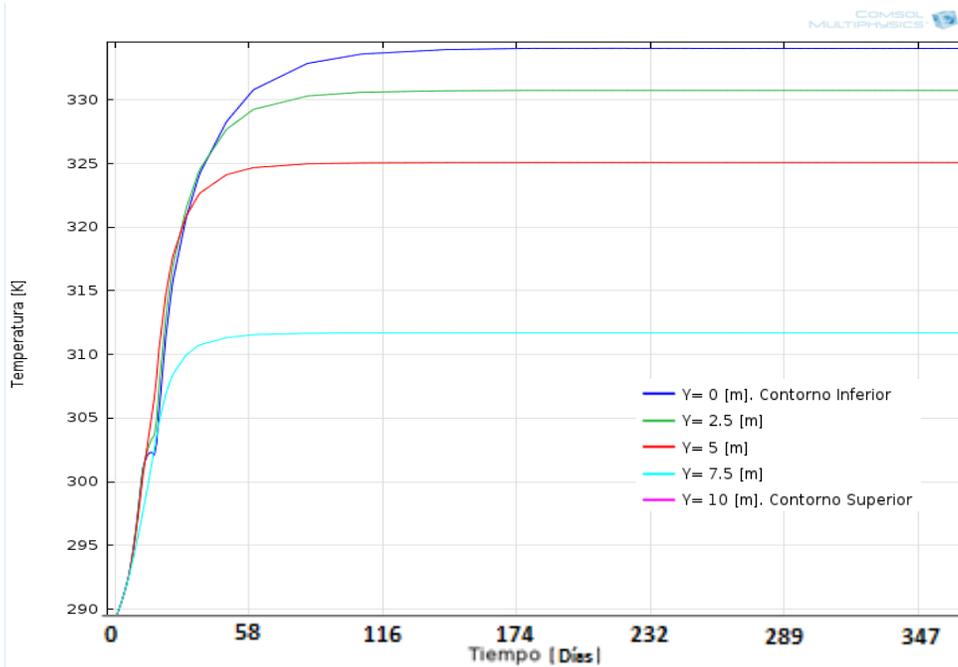
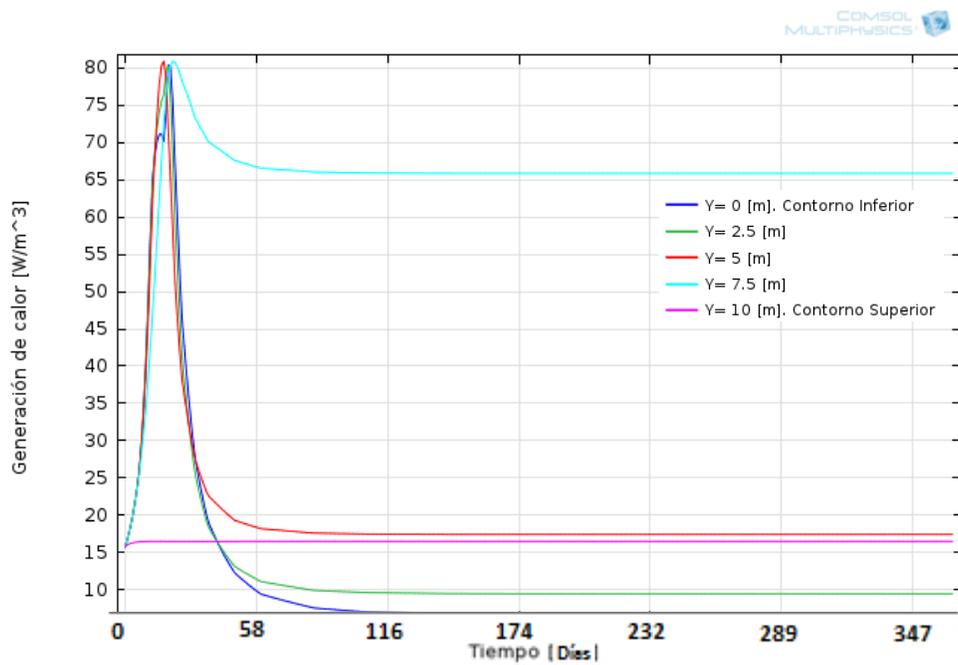
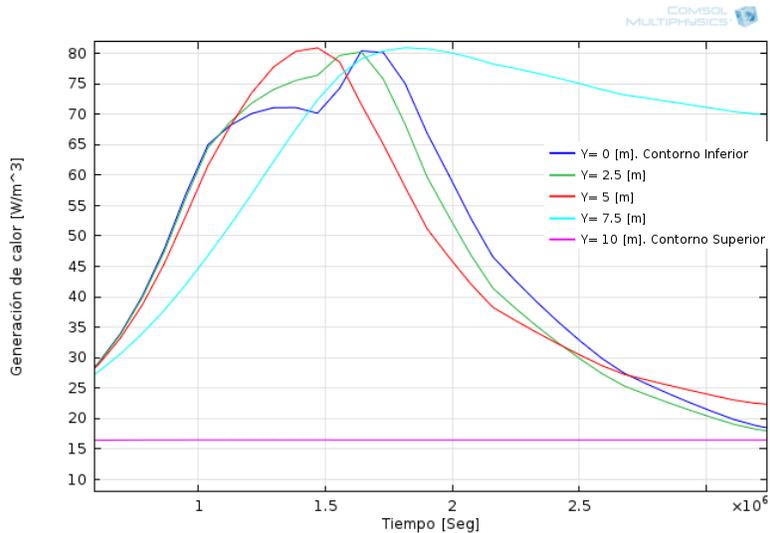


Figura 4.2-21: Caso 1- Temperatura en los puntos centrales de la pila



4.2-22: Caso 1 - Generación de calor en puntos de evaluación



4.2-23: Caso 1- Detalle generación de calor en puntos de evaluación

En los contornos de temperatura y en la figura anterior se ve como el primer día la temperatura tiene un leve aumento para luego subir rápidamente, donde al día 51 ya se alcanza una temperatura máxima de 328,9 [K], luego el aumento se realiza más lentamente, subiendo la temperatura máxima a 335,67 [K] a los 101 días, finalmente la pila alcanza su estado estable aproximadamente a los 87 días.

En los contornos se observa como el borde superior de la pila mantiene temperaturas bajas las cuales afectan el cuarto superior de la pila esto se produce primeramente por la convección del aire en el borde y luego por el fluido de irrigación que produce la convección interna, dado que el contorno de velocidad en la parte superior se alcanzan las mayores velocidades.

Se vuelven a notar los 2 “puntos calientes” cercano a los extremos inferiores de la pila, los cuales fueron explicados anteriormente.

Con respecto a la generación de calor alcanzada en la pila, se ve como solo el borde superior mantiene bajas generaciones debido a que presenta las temperaturas más bajas del sistema, mientras que al interior de la pila se alcanza la generación máxima en tiempos cercanos entre sí. Se ve como el punto $y = 7,5$ [m] mantiene una mayor generación de calor en el tiempo, esto se debe a que el fluido de irrigación no permite que aumente la temperatura a esa altura, disipando rápidamente el calor.

Los resultados anteriores representan la base de los próximos casos a estudiar.

4.2.2 Caso 2 - Efectos del tamaño de la pila:

En este caso se desea estudiar el efecto que tiene el tamaño de la pila en la temperatura promedio alcanzada

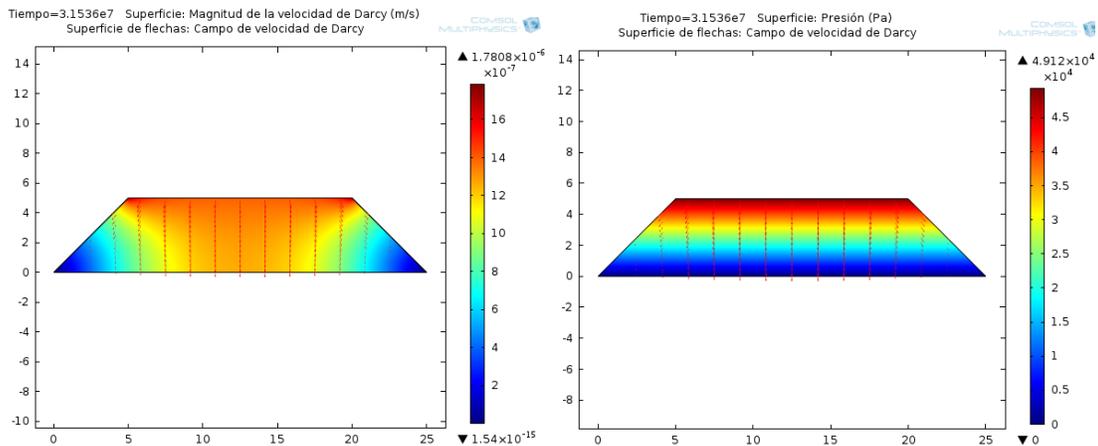
La pila considerada hasta ahora es la presentada en la Figura 3.2-1, la cual tiene 10 [m] de altura, 50 [m] de base y un talud 1:1, es la pila “mediana” considerada a continuación.

Las pilas estudiadas son:

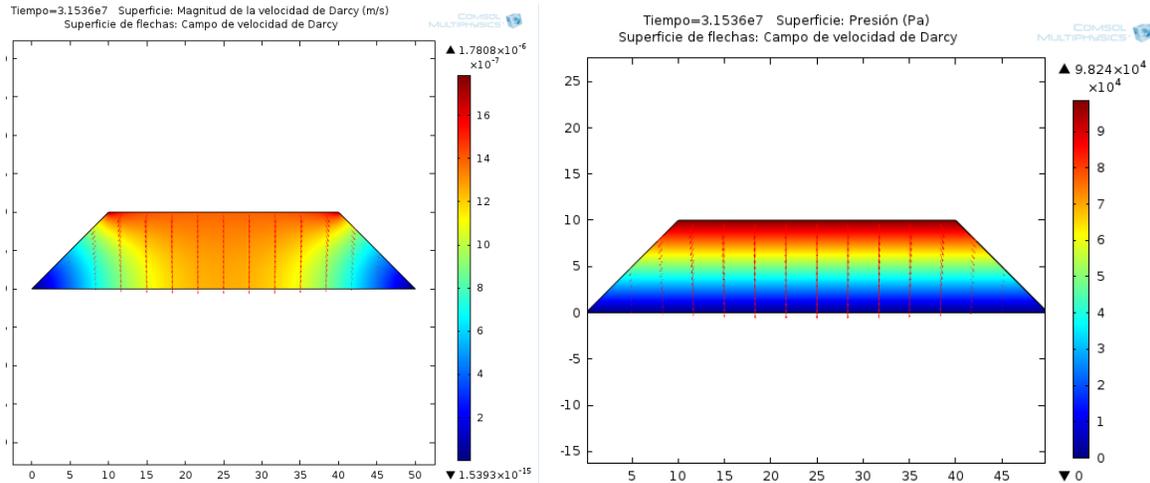
- A) 5 [m] altura, 25 [m] base, talud 1:1- Pila pequeña, línea roja
- B) 10 [m] altura, 50 [m] base, talud 1:1- Pila mediana, línea verde
- C) 20 [m] altura, 100 [m] base, talud 1:1 – Pila grande, línea azul

Para ver lo anterior se presentan los campos de presión (p en la ecuación 4.1) y velocidad para las 3 pilas en estudio.

A) Pila pequeña:

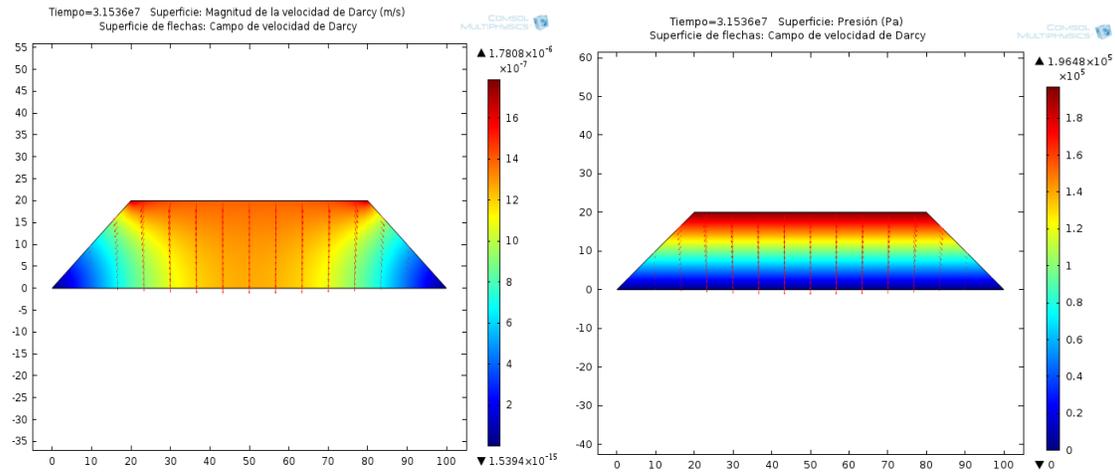


B) Pila mediana:



4.2-25: Caso 2- Contornos de velocidad de Darcy y presión en la pila mediana

C) Pila grande



4.2-26: Caso 2- Contornos de velocidad de Darcy y presión en la pila grande

Cabe notar que al variar el tamaño de la pila el campo de presión (Figura 4.1-2) varía proporcionalmente a la altura de la pila por lo cual el gradiente hidráulico se mantiene constante, obteniendo las mismas velocidades a pesar de la altura de la pila.

En lo anterior se ha mantenido la permeabilidad de la pila (k [m^2]), es decir, no cambia la resistencia del medio al paso del fluido (conductividad hidráulica (K [m/s])), por lo cual las velocidades se mantienen.

Las temperaturas promedio y las generaciones de calor promedio alcanzadas se presentan en las siguientes figuras.

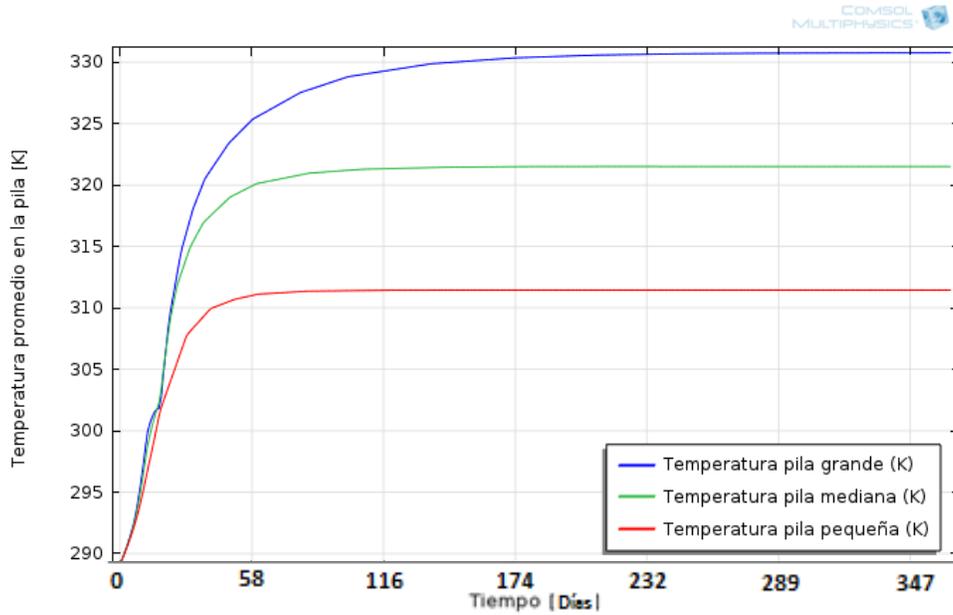


Figura 4.2-27: Caso 2 - Temperaturas promedio para diferentes pilas

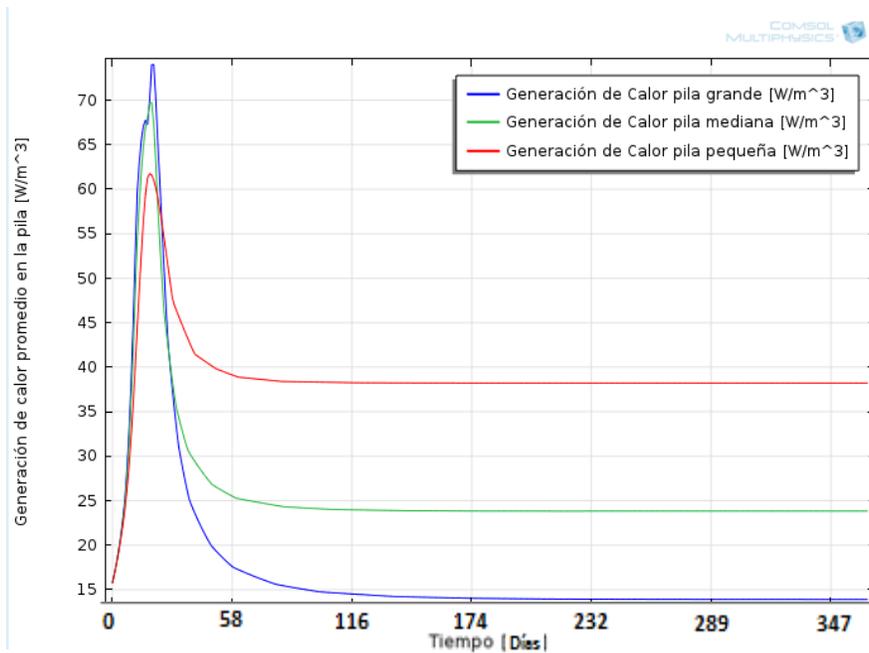


Figura 4.2-28: Caso 2 - Generación de calor promedio para diferentes pilas

Al aumentar el tamaño de la pila, aumenta la temperatura promedio alcanzada, siendo de 311,5 [K] para la pila pequeña, de 321,5 [K] para la pila mediana y de 331 [K] para la más grande, es decir, una variación aproximada de 10 [K] entre cada pila.

Las generaciones de calor alcanzan su peak aproximadamente a los 25 días, siendo el más alto el de la pila grande, aproximadamente $75 \text{ [W/m}^3\text{]}$, mientras que para la pila pequeña el peak llega a los $62 \text{ [W/m}^3\text{]}$. Luego las generaciones descenden hasta su estado estable, donde mientras más aumenta la temperatura más descenden.

En este caso se hace interesante analizar la influencia del peak de generación de calor y como este afecta la temperatura final de la pila en el estado estable. Se debe considerar que al aumentar el tamaño de la pila se reduce la capacidad de esta para disipar calor, por lo cual luego de que gran parte de la pila alcance una temperatura de 306 [K] , donde la generación de calor es máxima, la generación comenzará a disminuir pero aún aumentando la temperatura de la pila hasta que finalmente la velocidad de generación de calor se iguale a la velocidad de disipación de calor manteniendo la temperatura alcanzada constante.

Por esta razón las pilas más pequeñas en el estado estable permanecen con generaciones de calor más altas debido a que su disipación de calor es también más rápida, y sus peaks son menores ya que los fenómenos de contorno afectan mayores áreas de la pila sin alcanzar los 306 [K] .

Se continúa utilizando la pila mediana, de 10 [m] de altura, 50 [m] de base con talud $1:1$, dado que es la utilizada en los casos anteriores. Los tamaños de las pilas utilizadas en la industria dependerán de factores como la tasa de producción esperada, requerimientos técnicos como estabilidad de la pila, entre otros.

Para contrastar este caso se utiliza el trabajo titulado “*Thermophilic Bioleaching of Chalcopyrite Concentrates with GEOCOAT Process*” [35], donde se estudian columnas de biolixiviación con inoculación de bacterias a través de un modelo matemático, y resultados experimentales. En este estudio varían la altura de una columna obteniéndose el siguiente resultado.

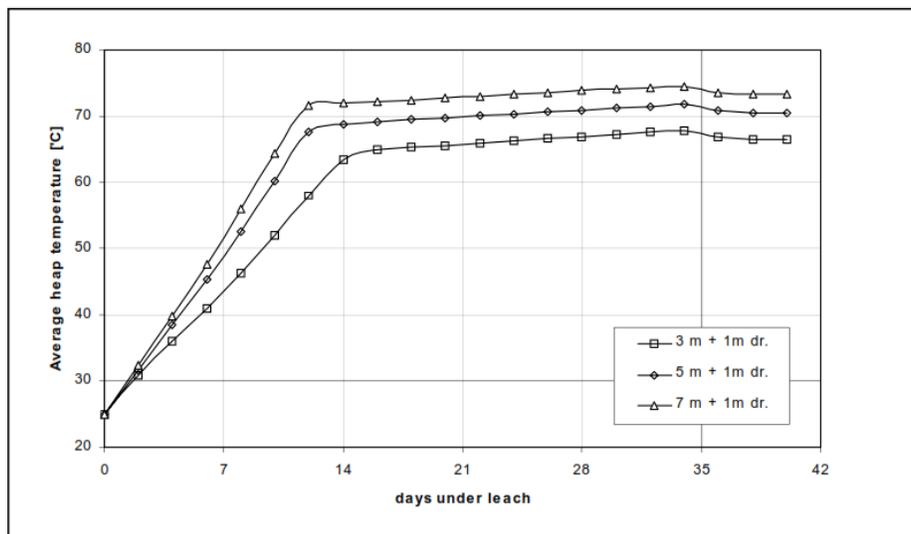


Figura 4.2-29: Temperatura promedio al variar la altura de la columna. (Condición base: Tasa de irrigación $7,5 \text{ [L/m}^2\text{hr]}$ y aireación de $3 \text{ [Kg/m}^2\text{hr]}$) [35]

En la figura anterior se observa que al aumentar la altura de la columna, aumenta la temperatura promedio alcanzada, donde para una altura de 3 [m] se alcanzan 65[°C], para 5 [m] se logran 70 [°C] y para 7 [m], alrededor de 72,5 [°C].

Las temperaturas promedios tan altas de este caso se debe a la inoculación de bacterias, lo cual aumenta la generación de calor.

4.2.3 Caso 3 - Efecto de la tasa de Irrigación:

Se estudia la influencia de la tasa de irrigación, la cual varía la velocidad al interior de la pila y con esto el campo convectivo producido por el fluido.

Hasta ahora se ha considerado una tasa constante de 5 [L/hm²], la cual ha sido escogida por ser utilizada en la industria y por diversos estudios.

Las tasas de estudio son:

- A) 2,5 [L/hm²]
- B) 5 [L/hm²]
- C) 10 [L/hm²]

Con el fin de sensibilizar el modelo también se considera una tasa de 0 [L/hm²], es decir, no hay un campo convectivo interno donde el modelo considera un sistema bifásico con generación de calor y difusión interna debido a la conducción.

A continuación se presentan los contornos de velocidad y los contornos de temperatura para el último día de simulación, contorno obtenido en el estado estable del sistema.

A) Tasa 0 [L/hm²]

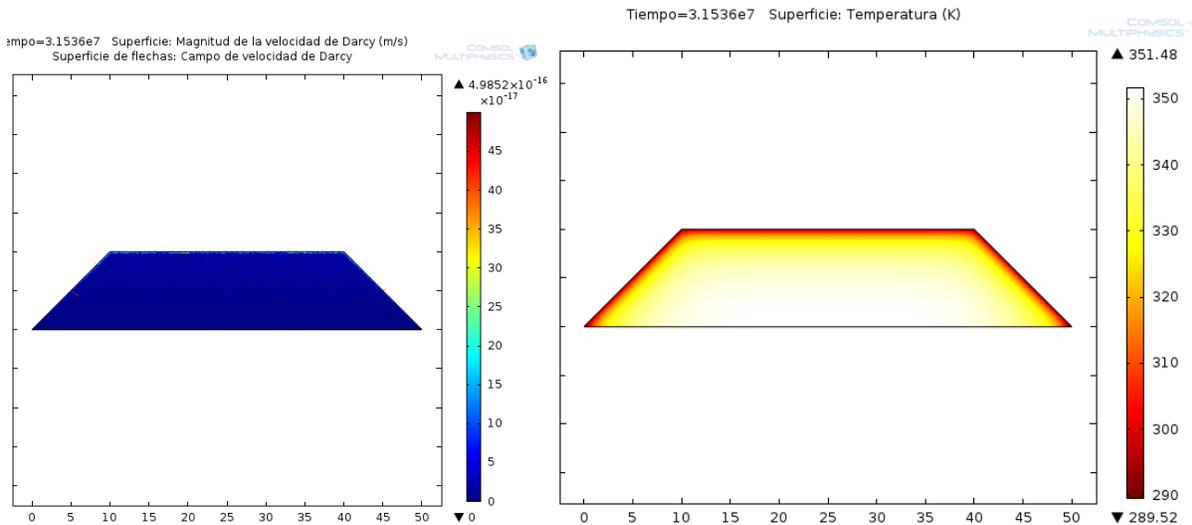


Figura 4.2-30: Caso 3-Contorno de velocidad y de temperatura para el día 365. Tasa de 0 [L/hm²]

B) Tasa 2,5 [L/hm²]

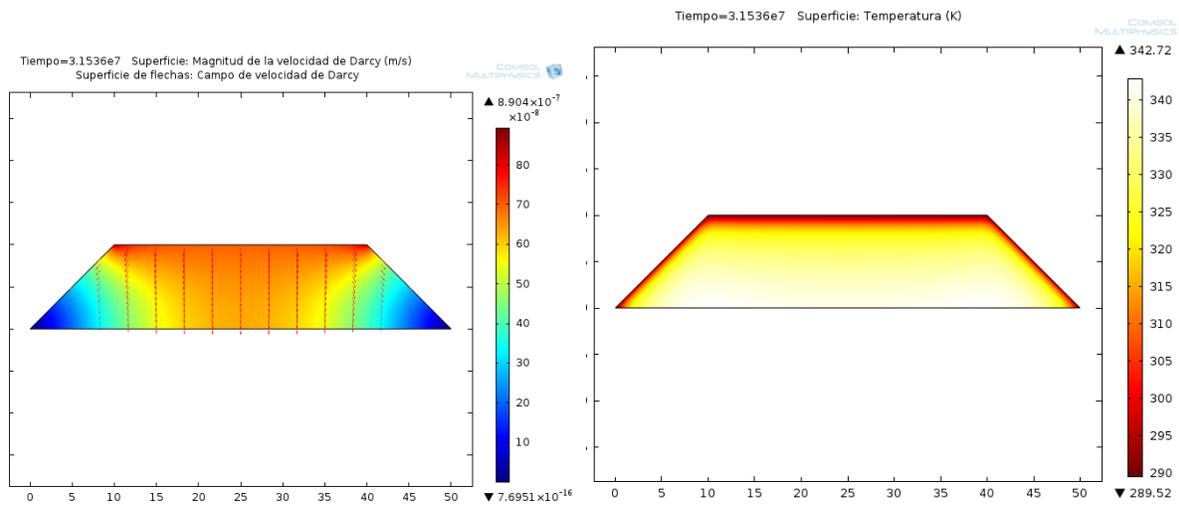


Figura 4.2-31: Caso 3-Contorno de velocidad y de temperatura para el día 365. Tasa de 2,5 [L/hm²]

C) Tasa 5 [L/hm²]

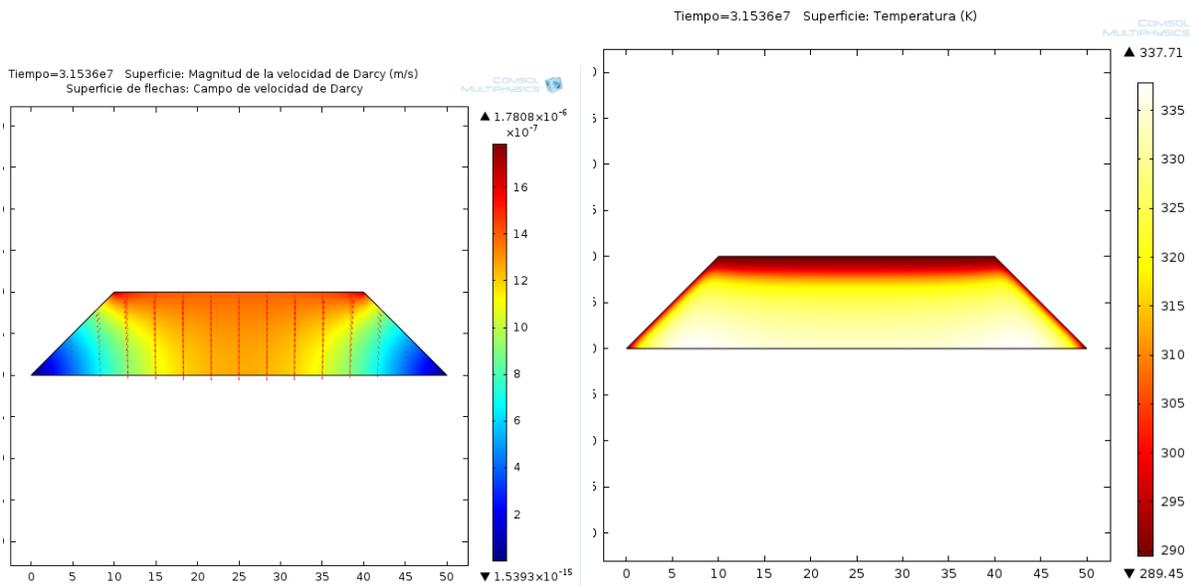


Figura 4.2-32: Caso 3-Contorno de velocidad y de temperatura para el día 365. Tasa de 5 [L/hm²]

D) Tasa 10 [L/hm²]

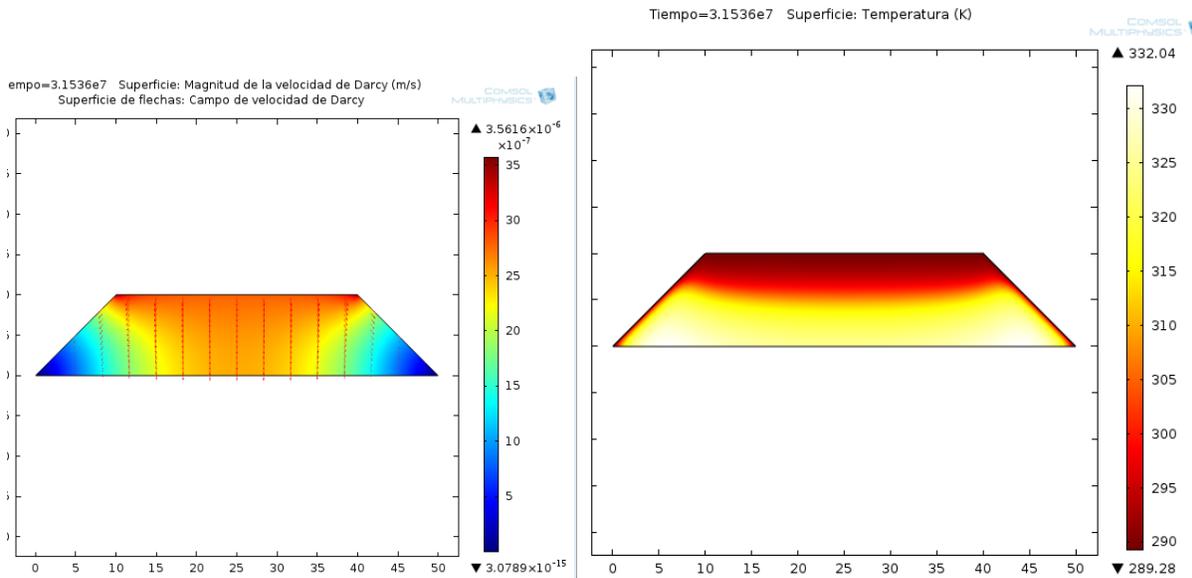


Figura 4.2-33: Caso 3-Contorno de velocidad y de temperatura para el día 365. Tasa de 10 [L/hm²]

En los contornos de velocidad se observa la misma proporcionalidad que en las tasas de irrigación, es decir, si la tasa de irrigación aumenta al doble lo mismo sucede con las velocidades al interior de la pila. Así mismo las tasas de variación de velocidad al interior de la pila son proporcionales para las distintas tasas por lo cual se observan los mismos contornos.

En cuanto a los contornos de temperatura, para el caso con una tasa de 0 [L/hm²] se observa un contorno homogéneo, manteniendo baja temperatura en los bordes y aumentando hacia el interior, sin generar “puntos calientes”, logrando una temperatura máxima de 351,8 [K].

Los demás contornos de temperatura muestran el efecto de aumentar la tasa de irrigación, principalmente en 3 aspectos, la influencia en el contorno superior causando enfriamiento de este, la presencia de 2 “puntos calientes” en la zona inferior y la temperatura máxima alcanzada en la pila.

En la siguientes figura se observan las temperaturas promedio y la generaciones de calor alcanzadas para distintas tasas de irrigación.

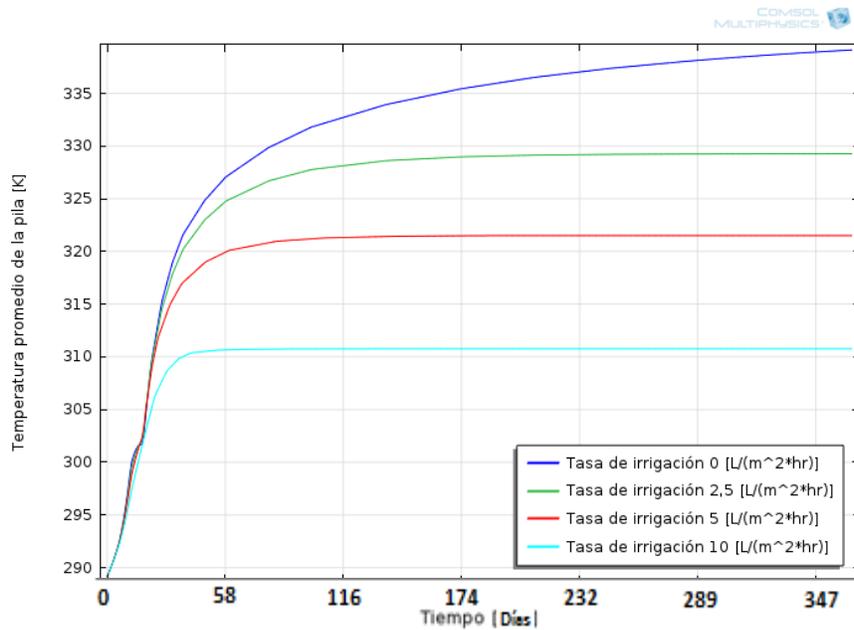


Figura 4.2-34: Caso 3 - Temperatura promedio para diferentes tasas de irrigación

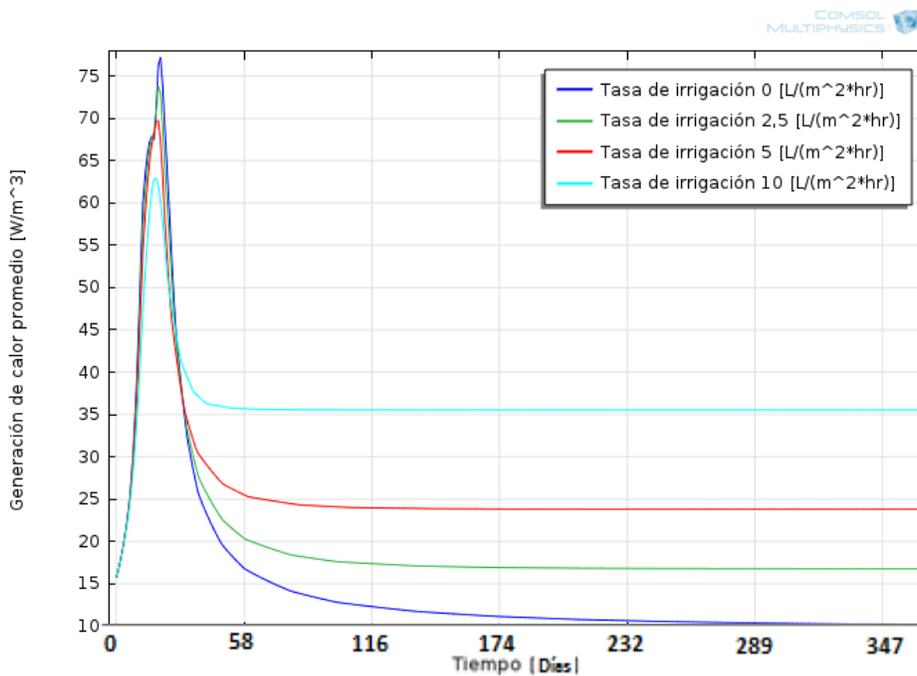


Figura 4.2-35: Caso 3 - Generación de calor promedio para diferentes tasas de irrigación

En las figuras anteriores se observa como afecta la tasa de irrigación en el sistema, principalmente, al aumentar el campo convectivo interior disminuye la temperatura promedio alcanzada, desde 329 [K] con una tasa de 2,5 [L/hm²] a 321,5 [K] con 5 [L/hm²] y luego a 311 [K] con una tasa de 10 [L/hm²], es decir, variaciones de 7,5 [K] y de 10,5 [K], respectivamente.

La generación de calor alcanzada muestra como a mayor campo convectivo interno se alcanzan menores peaks y aumenta la rapidez de disipación de calor por lo cual en el estado estable se obtienen mayores generaciones de calor.

Cabe notar que esto es una simplificación del sistema real, en el cual se presentan 3 fases, donde el campo convectivo interior depende de la interacción de la aireación y la irrigación, aún así es importante notar la gran influencia que tendrá la convección interna en las temperaturas alcanzadas.

Se debe estudiar la relación óptima de aireación e irrigación con el fin de mantener un campo convectivo adecuado en la pila.

A continuación se estudia la generación de calor necesaria para mantener las temperaturas en caso de aumentar las velocidades al interior de la pila. Se utilizan las mismas tasas de irrigación presentadas, aumentando la generación de calor en la misma proporción y se observan las temperaturas promedios alcanzadas.

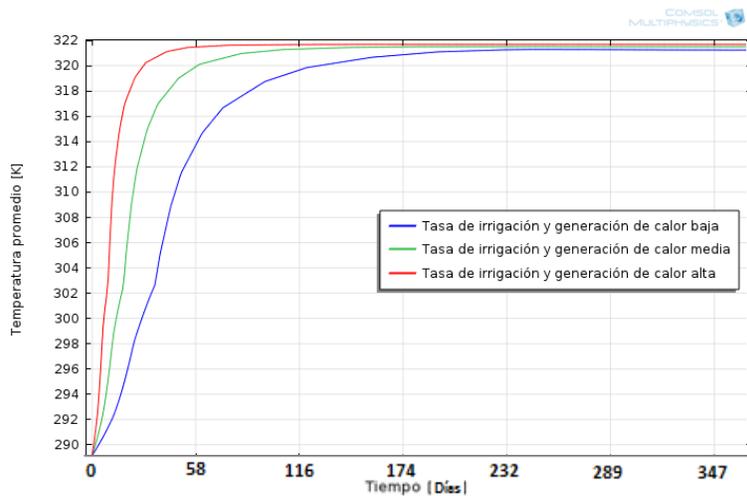


Figura 4.2-36: Temperaturas promedios variando la tasa de irrigación y la generación de calor en la misma proporción

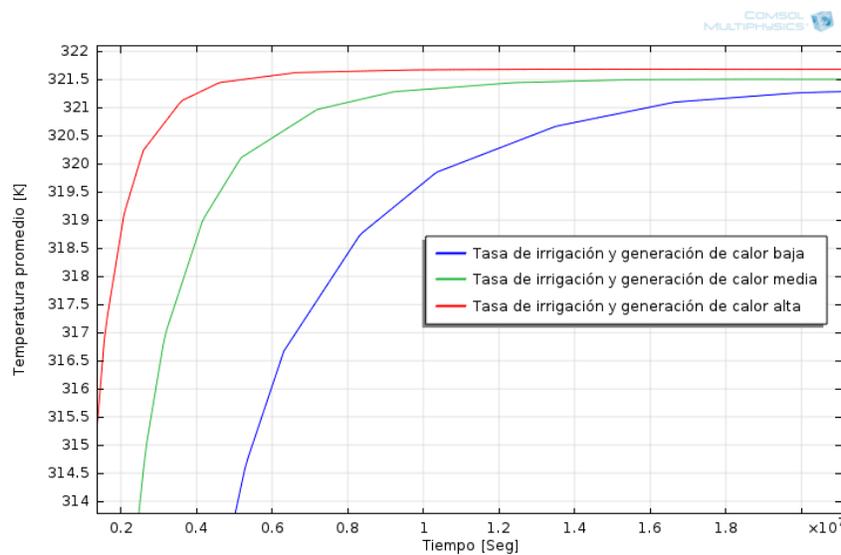


Figura 4.2-37: Detalle de temperaturas promedios variando la tasa de irrigación y la generación de calor en la misma proporción

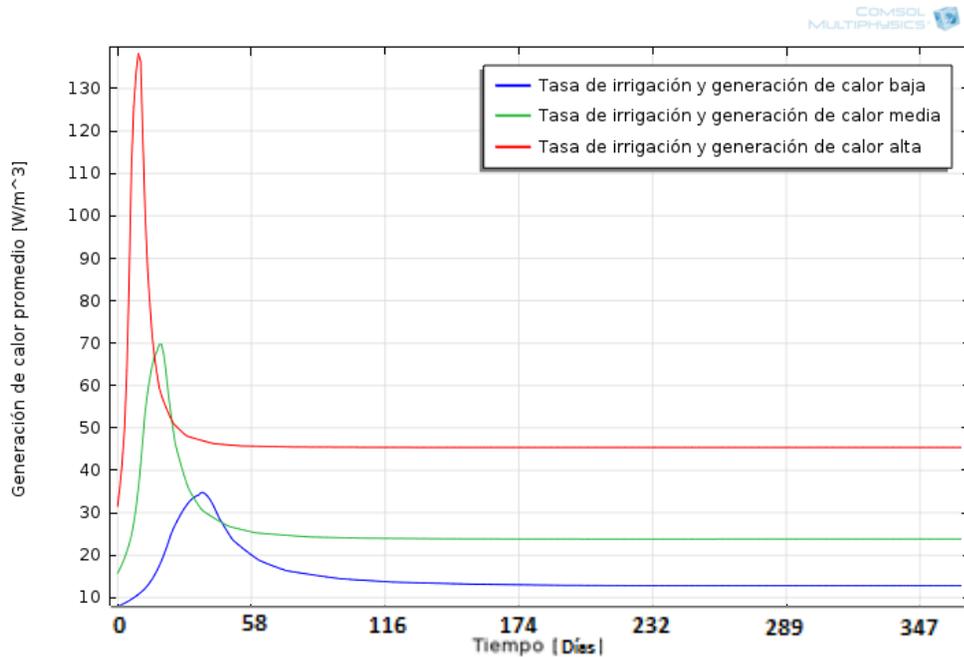


Figura 4.2-38: Generaciones de calor promedio alcanzado al variar la tasa de irrigación y la función de generación de calor en la misma proporción

Las figuras anteriores muestran como al variar la tasa de irrigación y la generación de calor de forma proporcional (por ejemplo, si se aumenta la irrigación al doble la generación también se aumenta al doble) se alcanzan temperaturas promedio en la pila muy similares. Esto muestra los efectos dominantes tanto de la generación de calor como del campo convectivo interno en la temperatura de la pila.

Esta proporcionalidad entre la generación de calor y el campo convectivo es debido a que se mantiene el balance entre la generación y la disipación de energía, obteniendo contornos de temperatura equivalentes.

Las mayores diferencias se muestran en el tiempo que tardan en llegar al estado estable, a mayor generación de calor más rápido se alcanza el equilibrio debido a que en el estado inicial de la pila la generación es más alta propiciando el aumento de la temperatura llegando rápidamente a los 306 [K] , donde se alcanza la máxima generación de calor.

Para contrastar el efecto del campo convectivo al interior de la pila, se considera el estudio de Dixon [31] en 1D, tomando en cuenta una tasa de aireación e irrigación.

La siguiente figura muestra la temperatura promedio obtenida para una tasa de irrigación (G_i) de $5 \text{ [kg/m}^2\text{hr]}$ y de $10 \text{ [kg/m}^2\text{hr]}$, así mismo para dos tasas de generaciones de calor (S_0), 10 y $20 \text{ [W/m}^3]$, considerando 3 tasas de aireación (G_a).

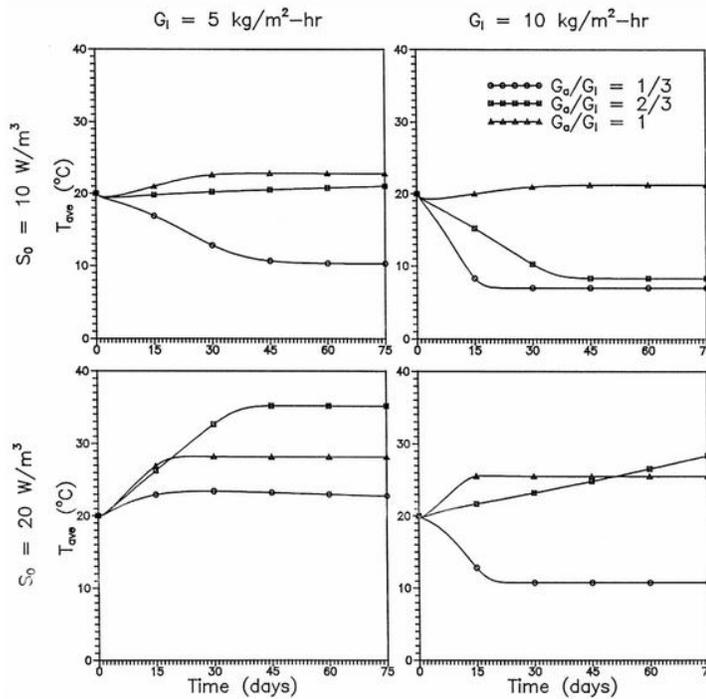


Figura 4.2-39: Efecto de la tasa de irrigación, tasa de aireación y de generación de calor [31]

Al aumentar la tasa de irrigación de 5 a 10 [kg/m²hr], manteniendo constante la aireación, la temperatura promedio disminuye. Siendo el efecto aún más visible cuando la irrigación es 3 veces la aireación.

De la figura anterior se desprende, además, que la mejor combinación de fenómenos se da para una relación de 2/3 entre la aireación y la irrigación, cuando esta última es de 5 [kg/m²hr] y la generación es de 20 [W/m³].

Lo mismo se observa al variar solo la tasa de aireación, como en la siguiente figura.

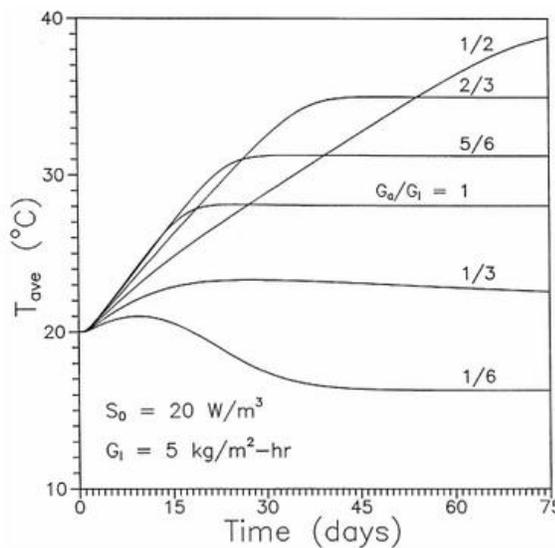


Figura 4.2-40: Temperatura promedio para diferentes tasas de aireación [31]

4.2.4 Caso 4 - Efecto del aumento en la temperatura del fluido de irrigación:

Se sabe que la temperatura alcanzada en el proceso de biolixiviación es de gran importancia, por lo cual se han buscado métodos para aumentar la temperatura en una pila en terreno, entre esos métodos se ha considerado aumentar la temperatura de la aireación y del fluido de irrigación con el fin de aportar calor al sistema.

Este caso estudia el efecto de aumentar la temperatura del fluido de irrigación, lo cual actúa como un aporte energético en el contorno superior de la pila.

Se consideran 4 casos:

- A) Sin efecto de la temperatura de irrigación
- B) Temperatura de irrigación de 291,15 [K] (18°C)
- C) Temperatura de irrigación de 301,15 [K] (28°C)
- D) Temperatura de irrigación de 311,15 [K] (38°C)

Las siguientes figuras muestran las temperaturas promedio y las generaciones de calor promedio alcanzadas en la pila, además se muestra el aporte energético producido por el fluido de irrigación en el contorno superior.

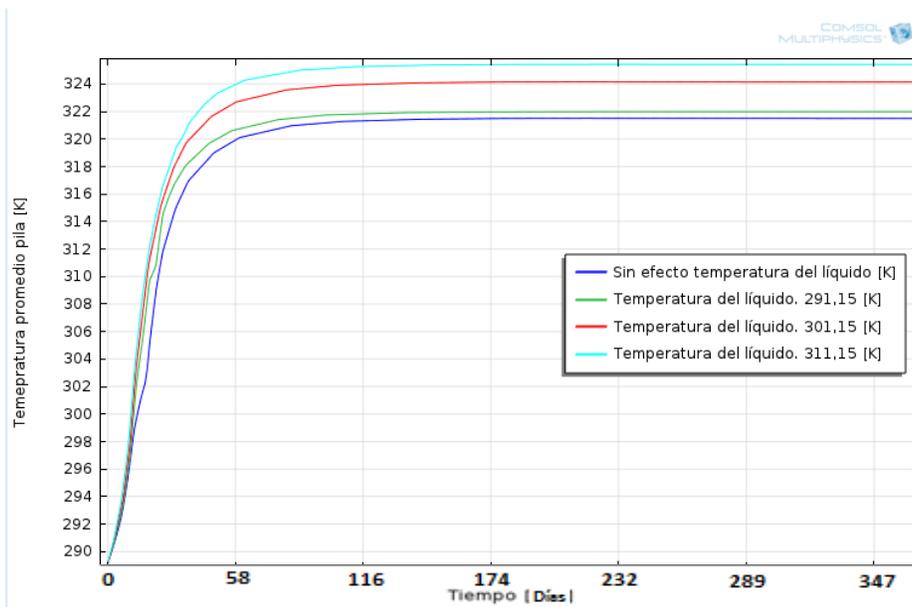
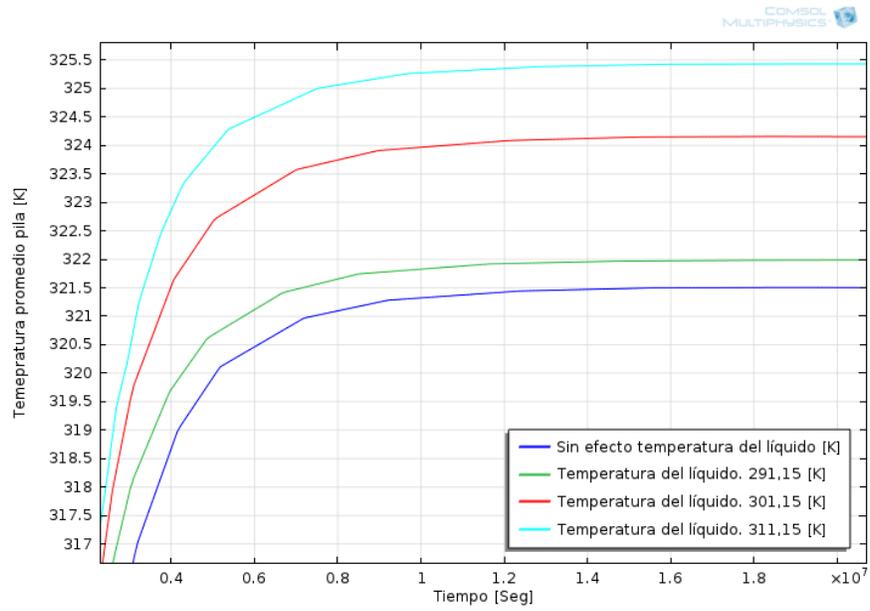


Figura 4.2-41: Caso 4- temperaturas promedio para distintas temperaturas de irrigación



4.2-42: Caso 5- Detalle de temperaturas promedio para distintas temperaturas de irrigación

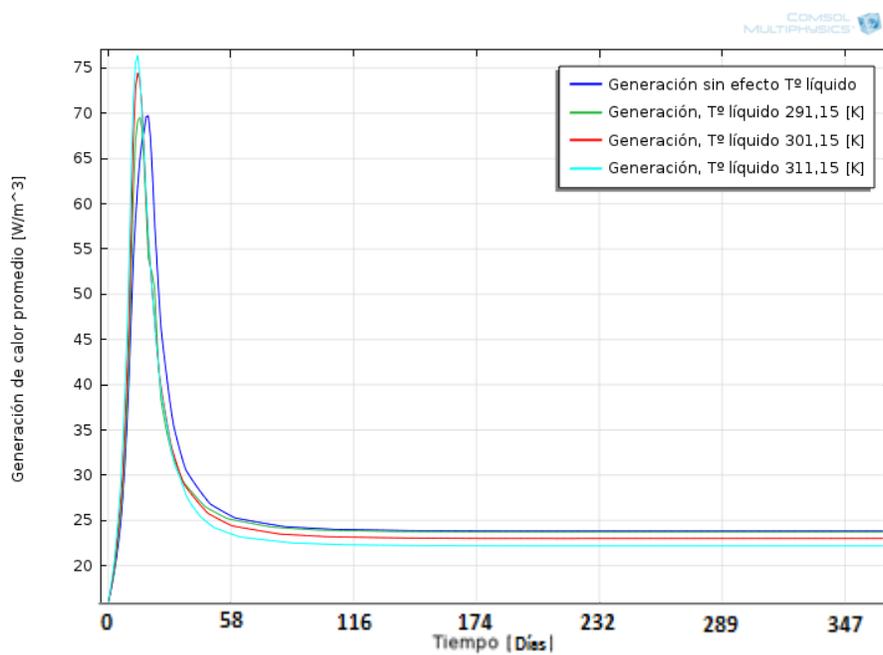
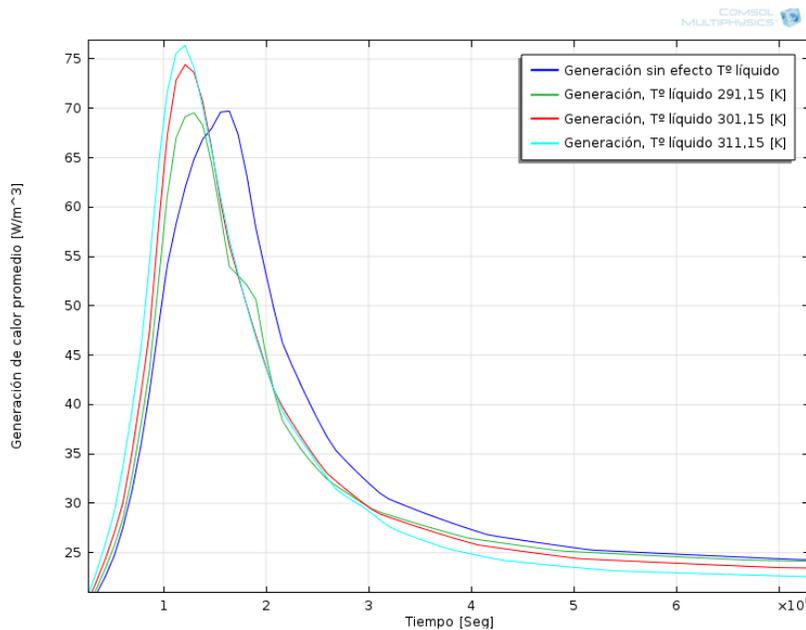


Figura 4.2-43: Caso 4- Generación de calor promedio para distintas temperaturas de irrigación



4.2-44: Caso 4- Detalle de la generación de calor promedio para distintas temperaturas de irrigación

En las figuras anteriores se ve el leve aumento en la temperatura promedio de la pila que produce el aumento de la temperatura de irrigación.

Cuando el modelo no considera esta fuente de contorno la temperatura promedio es de 321,5 [K], si el fluido de irrigación ingresa a 291,15 [K] la temperatura aumenta a 322 [K], luego cuando la irrigación es a 301,15 [K] la temperatura promedio asciende a 324 [K], para finalmente cuando la irrigación se produce a 311,15 [K] la temperatura promedio alcanza los 325,5 [K], es decir, el mayor aumento logrado es para este último caso donde la temperatura promedio aumenta en 4 [K].

Las generaciones de calor muestran el leve aporte obteniéndose el mayor peak para la temperatura de 311,15 [K].

Este aumento de temperatura en el fluido de irrigación tiene la desventaja de propiciar las pérdidas de fluido y calor por evaporación por lo cual al implementarlo se deben tener los cuidados suficientes como tapan la pila y utilizar aspersores optimizados para disminuir las pérdidas, o incluso enterrar los aspersores.

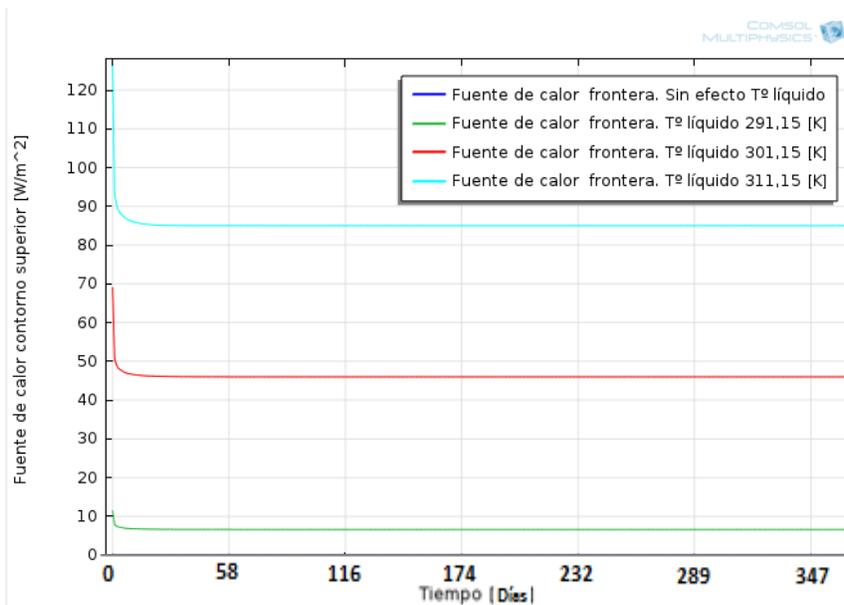


Figura 4.2-45: Caso 4- Aporte energético en contorno superior debido a las distintas temperaturas de irrigación

En la figura anterior se observa el aporte energético de aumentar la temperatura del fluido. En la condición inicial se tiene un aporte energético mayor dado que hay una mayor diferencia de temperatura entre el borde exterior y el fluido, al aumentar la temperatura del borde externo la fuente de calor disminuye manteniéndose constante el resto del tiempo, debido a que el borde mantiene su temperatura.

Se presentan los contornos de temperatura en el tiempo de simulación para una temperatura de irrigación de 301,15 [K].

86.400 [seg] (1 Día):

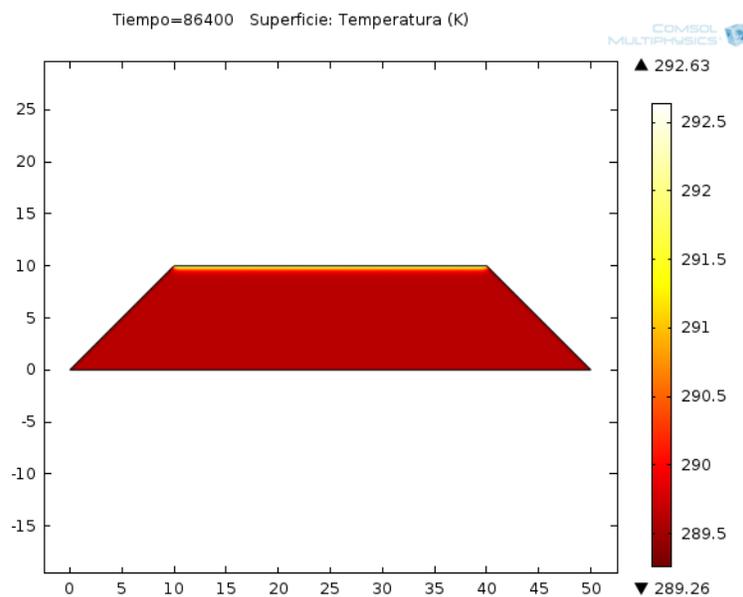


Figura 4.2-46: Caso 4- Contorno temperatura 1 día

$4.4064 \cdot 10^6$ [seg] (51 días):

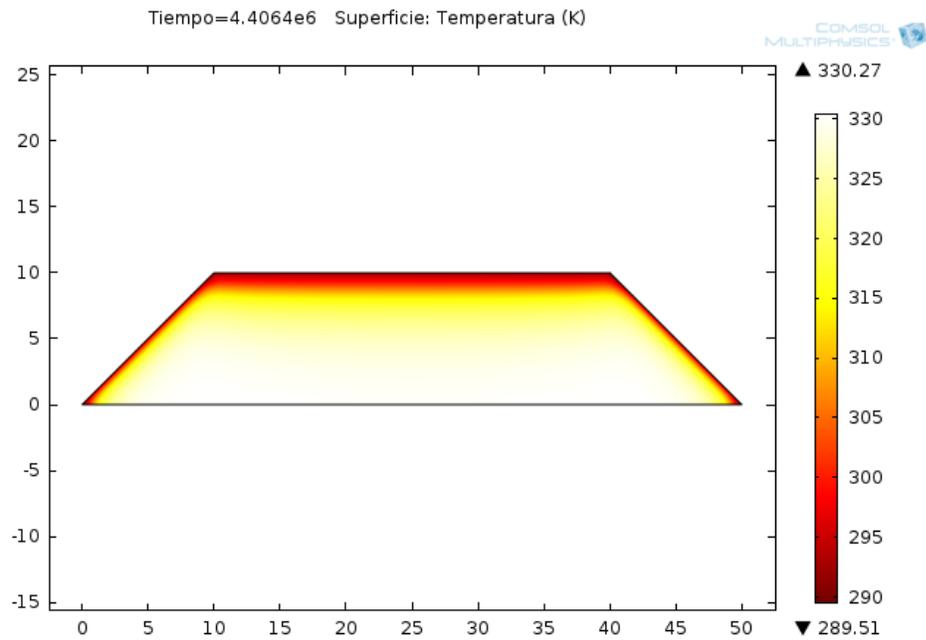


Figura 4.2-47: Caso 4 - Contorno temperatura día 51

$8.7264 \cdot 10^6$ [seg] (Día 101)

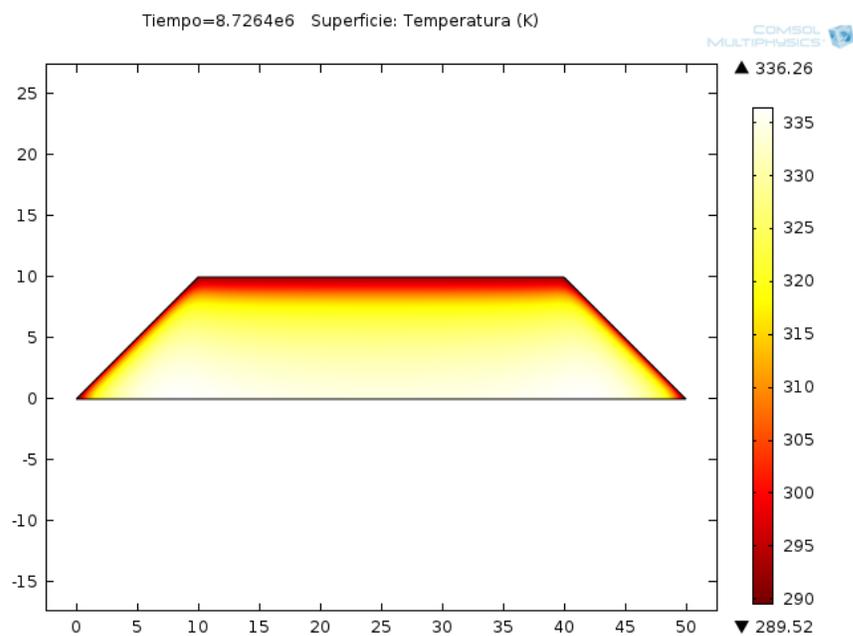


Figura 4.2-48: Caso 4 - Contorno temperatura día 101

1.73664×10^7 [seg] (Día 201)

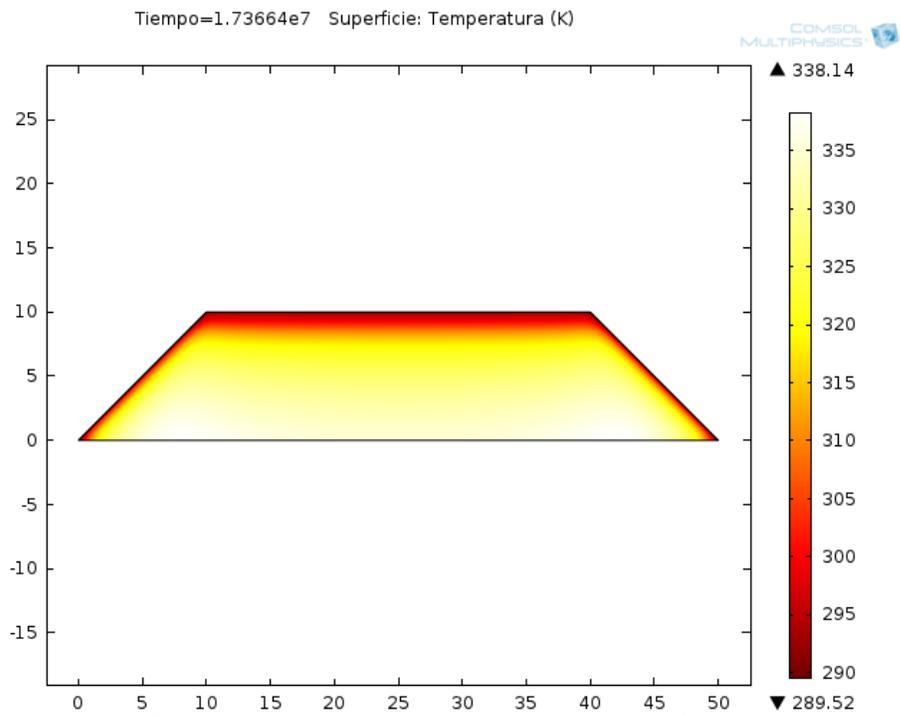


Figura 4.2-49: Caso 4- Contorno temperatura día 201

2.60064×10^7 [seg] (Día 301)

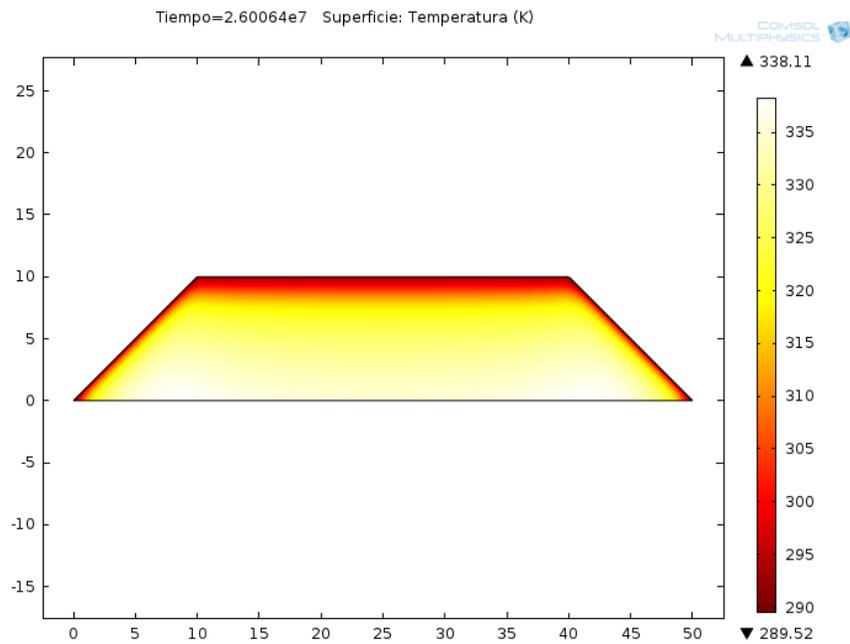


Figura 4.2-50: Caso 4 - Contorno temperatura día 301

$3.1536 \cdot 10^7$ [seg] (Día 365)

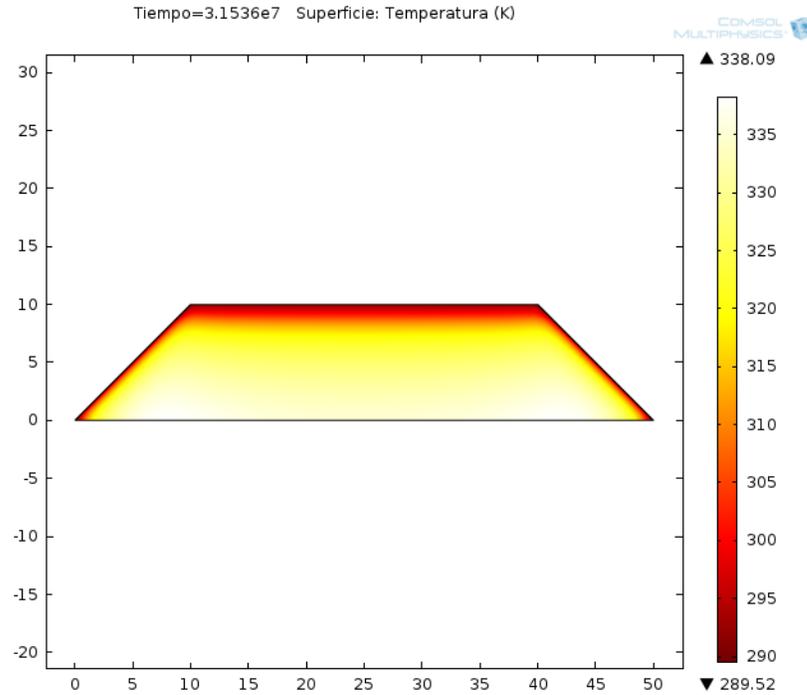


Figura 4.2-51: Caso 4 - Contorno temperatura día 365

Los contornos obtenidos son similares a los antes presentados, para el primer día se observa el efecto de la fuente de contorno, luego el borde externo alcanza una temperatura constante, en las temperaturas interiores se observa el leve aumento causado al comparar con los contornos del caso 2 (“Contraste para diferentes generaciones de calor”).

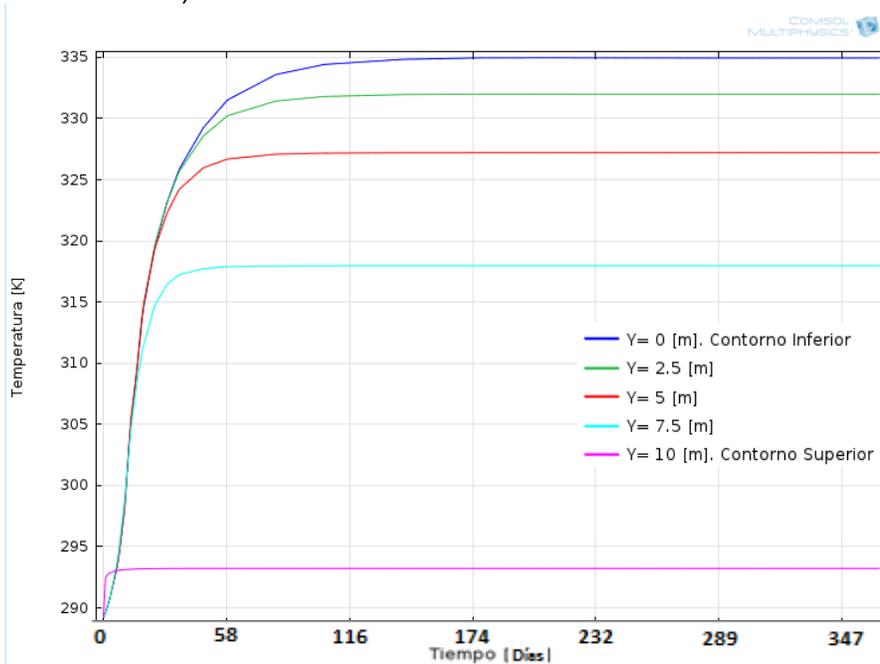


Figura 4.2-52: Caso 4 - Temperatura en los puntos de evaluación al centro de la pila

La siguiente figura muestra la temperatura en función de la altura en el centro de la pila, para los 365 días de evaluación, se observa de otra forma lo que muestran los contornos de las figuras 4.2-48 a la 4.2-51. La temperatura aumenta hacía el centro de la pila, y la densidad de líneas es mayor hacía el final lo que muestra la convergencia de los resultados, es decir, el equilibrio al cual llega este caso, como también se observa en la figura anterior (4.2-52).

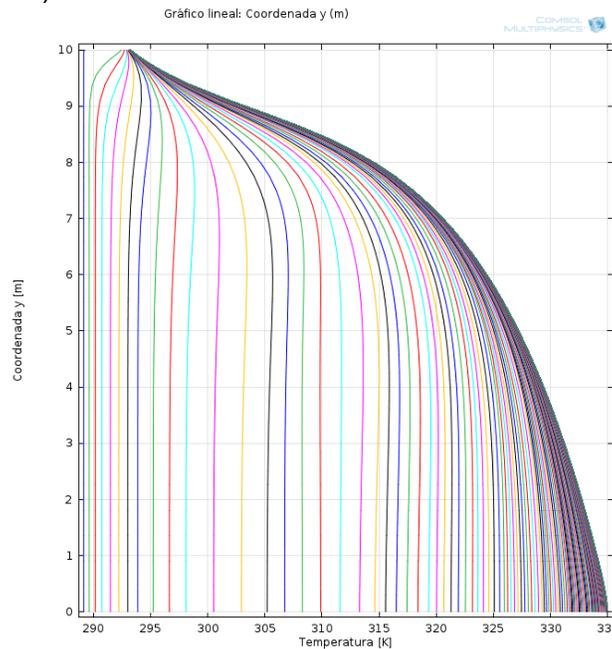


Figura 4.2-53: Caso 4 – Perfil de temperatura al centro de la pila. Temperatura de irrigación: 301 [K]

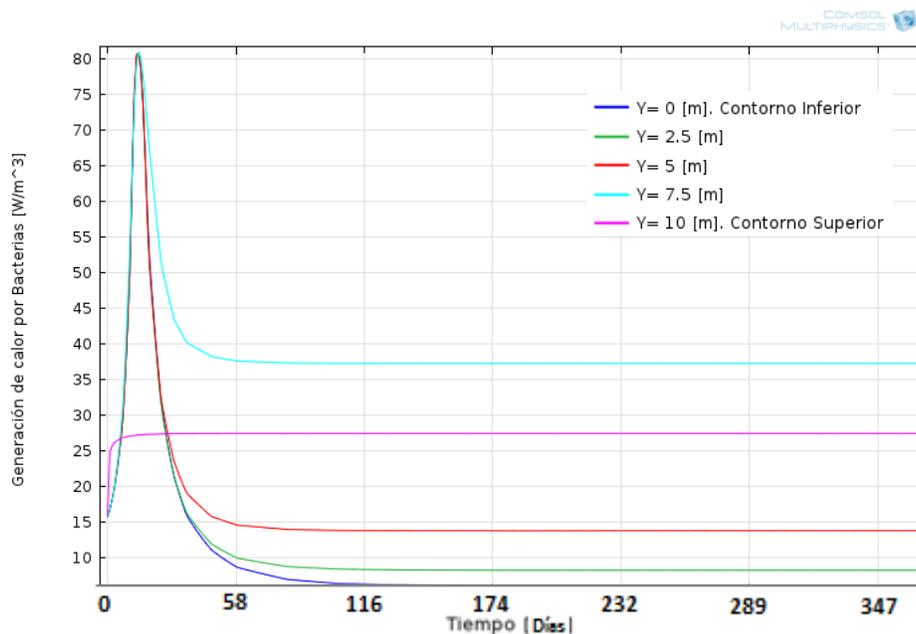
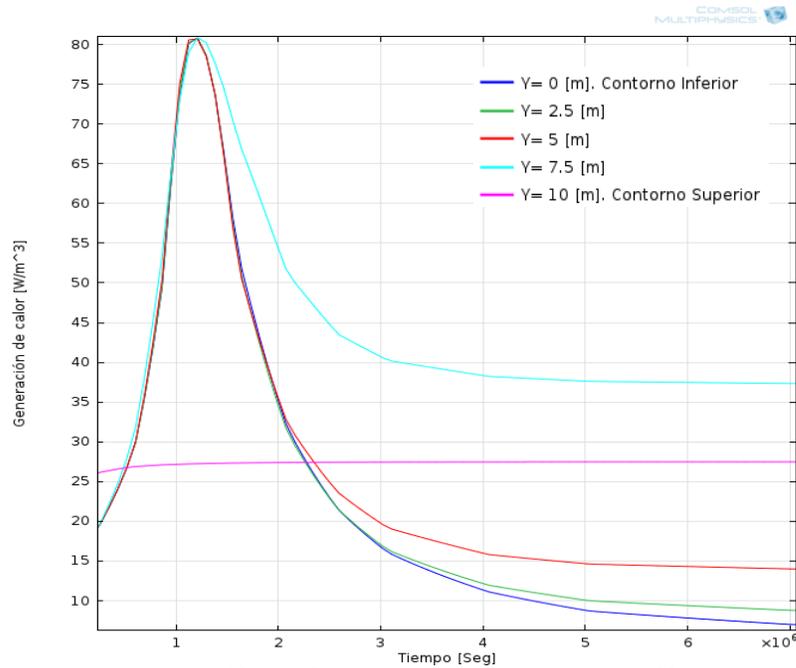


Figura 4.2-54: Caso 4 - Generación de Calor en los puntos de evaluación al centro de la pila



4.2-55: Caso 4 - Detalle de la generación de Calor en los puntos de evaluación al centro de la pila

La principal característica de las figuras anteriores es el comportamiento del borde externo de la pila ($y = 10$ [m], rosado), el cual aumenta rápidamente su temperatura y luego la mantiene al igual que la generación de calor en ese punto, esto propicia el aumento de las temperaturas hacia el interior de la pila.

La siguiente figura muestra un balance de calor en el borde superior del sistema.

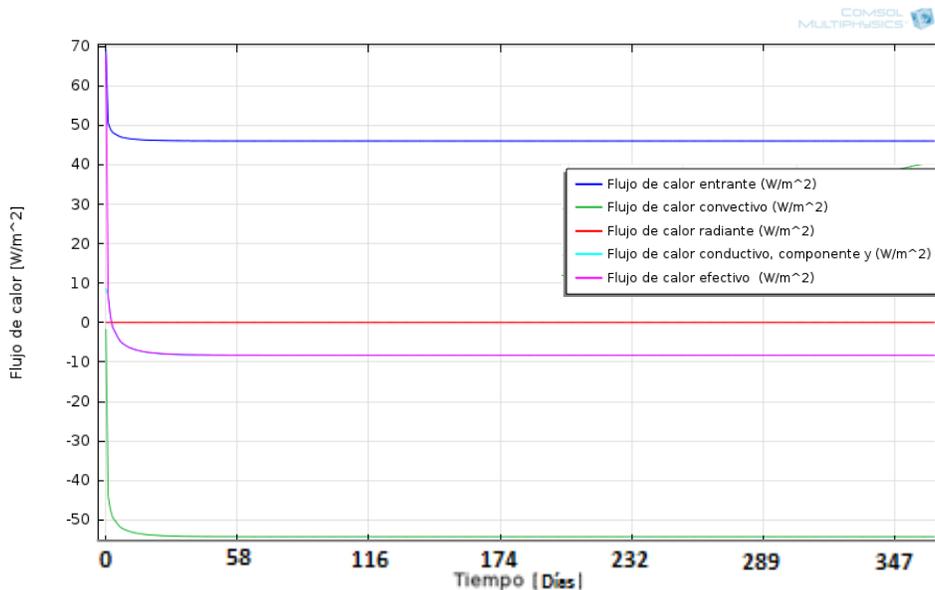


Figura 4.2-56: Caso 4- Balance de flujos de calor en el punto medio del contorno superior

Se observa el calor entrante por el fluido de irrigación (línea azul) y el calor de salida debido a la convección del viento (línea verde), lo cual da el flujo de calor efectivo

(línea rosada) el cual es negativo es decir se está produciendo pérdida de calor por aquel contorno, la cual es mucho menor que si no existiese la fuente de calor. La línea rojo es el flujo radiante el cual no está considerado en este caso.

La siguiente figura muestra el efecto de aumentar la temperatura del fluido de irrigación desde 10 [°C] a 30 [°C], para dos tasas de aireación diferentes.

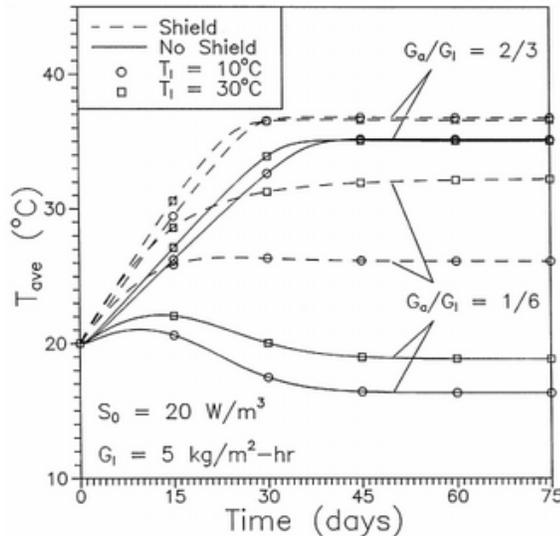


Figura 4.2-57: Efecto de incrementar la temperatura del fluido de irrigación [31]

“Shiel” y “No Shield” hace referencia a si la pila está cubierta o no por una lámina plástica HDPE, lo cual se estudia en el siguiente caso. Se observa que para una relación entre la aireación y la irrigación de 1/6, existe un leve aporte a la temperatura promedio de 4 [°C], aproximadamente. Mientras que para una relación de 2/3 el aporte es prácticamente nulo.

La siguiente figura muestra como la temperatura tiende a aumentar hacia el interior de la pila, cuando la tasa de irrigación es mucho mayor que la de aireación, en este caso al principio la temperatura es mayor al principio para luego alcanzar un equilibrio más frío lo cual se debe a las condiciones iniciales y de borde, donde la temperatura de irrigación es de 283 [K] (10°C) y la temperatura inicial de la pila es de 293 [K], mientras que la generación es constante de 20 [W/m³]. Cabe notar que el enfriamiento en la parte inferior de la pila se debe al ingreso de aire, lo cual no fue considerado en este caso de estudio.

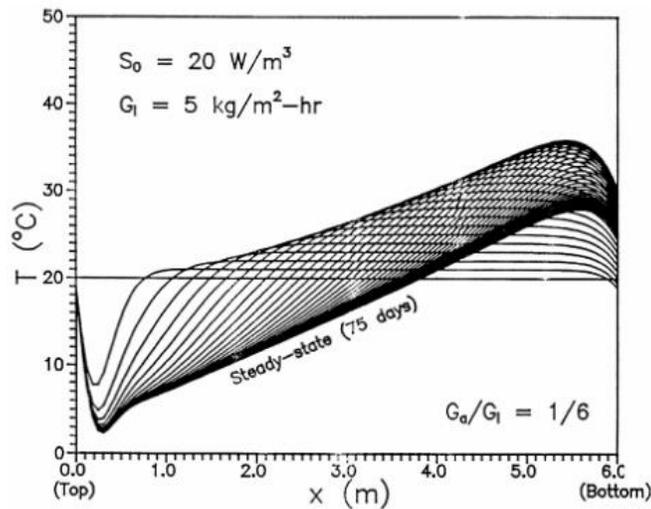


Figura 4.2-58: Perfil de temperatura. Temperatura de entrada del fluido: 283[K] [31]

Es preciso notar nuevamente como al lograr un campo convectivo interno favorable la temperatura promedio se ve mucho más beneficiada.

4.2.5 Caso 5 - Efectos de las condiciones ambientales:

En este caso se agregan las condiciones ambientales al modelo, las cuales son de gran interés debido a que la pila se mantiene en terreno, bajo condiciones variables de radiación, temperatura ambiente, velocidad del viento, entre otros. Como el paso de tiempo de la simulación es de 1 día, se consideran valores promedios para una zona previamente escogida en el norte de Chile.

Se consideran 4 sub-casos:

- A) Sin evaporación en el contorno superior
- B) Con evaporación en el contorno superior
- C) Cubriendo la pila
- D) Cubriendo la pila y aumentando la temperatura del fluido de irrigación a 301,15 [K]

Cabe notar que el caso C y D también consideran la evaporación en el contorno superior pero atenuando los efectos medioambientales al cubrir la pila con un polietileno de alta densidad (HDPE), lo cual es practicado en algunas pilas en terreno ([9, 10, 11]).

La siguiente figura muestra las temperaturas promedio obtenidas para cada caso.

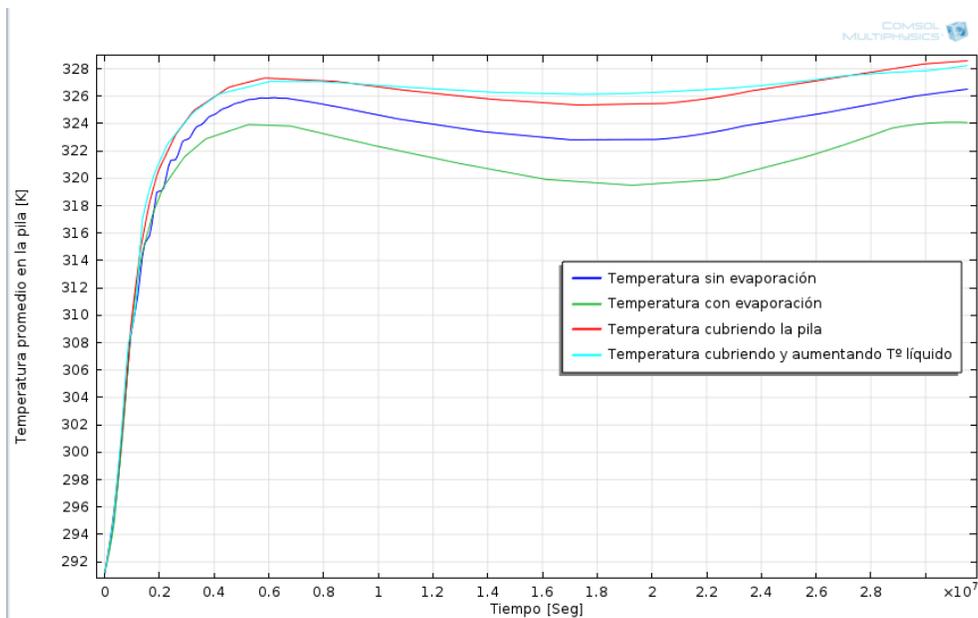


Figura 4.2-59: Caso 5 - Temperaturas promedios según condiciones ambientales

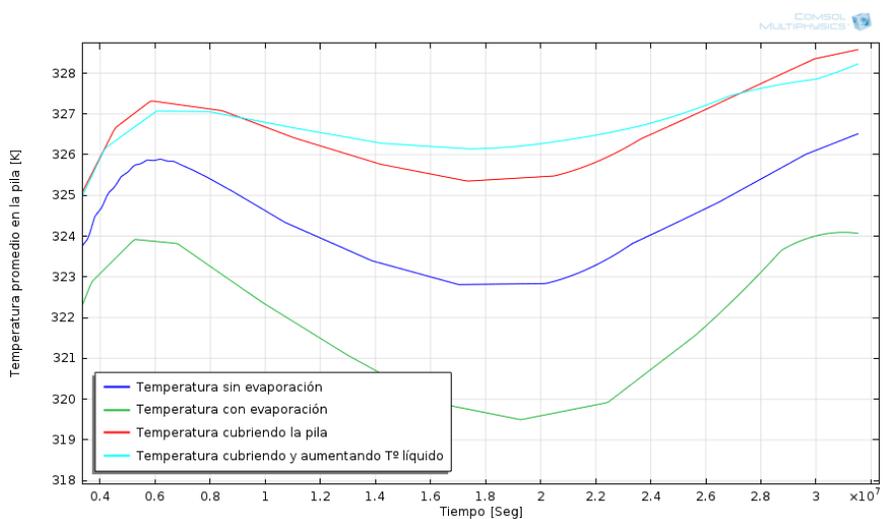


Figura 4.2-60: Caso 5 - Detalle de las temperaturas promedios alcanzadas

Las figuras anteriores muestran la variación estacional en la temperatura promedio de la pila, siendo mayor en verano (principio y final de la simulación) y menores en invierno.

El caso sin evaporación (línea azul) es una condición promedio entre el caso con evaporación (línea verde) y el de cubrir la pila (línea roja), además se ve como se alcanza una mayor temperatura al cubrir la pila, teniendo una variación aproximada de 3 [K] en verano y de 6 [K] en invierno, con respecto a la pila descubierta.

Al aumentar la temperatura del fluido de irrigación hasta los 301,15 [K] (línea celeste) se observa solo un leve aporte en invierno, subiendo la temperatura alrededor de 1 [K], pero una pérdida de calor en verano.

La siguiente figura muestra la generación de calor promedio para cada caso.

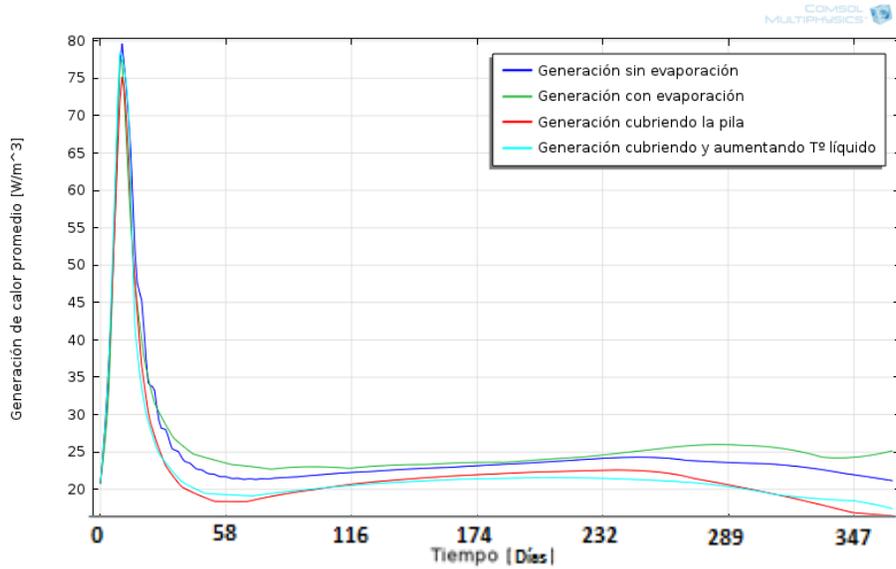


Figura 4.2-61: Caso 5 - Generación de calor promedio para cada caso

Nuevamente se observa un peak de generación, el cual es alcanzado en el mismo tiempo para cada caso, las generaciones son similares entre sí, diferenciándose levemente en el peak alcanzado y como se desarrollan en el tiempo restante.

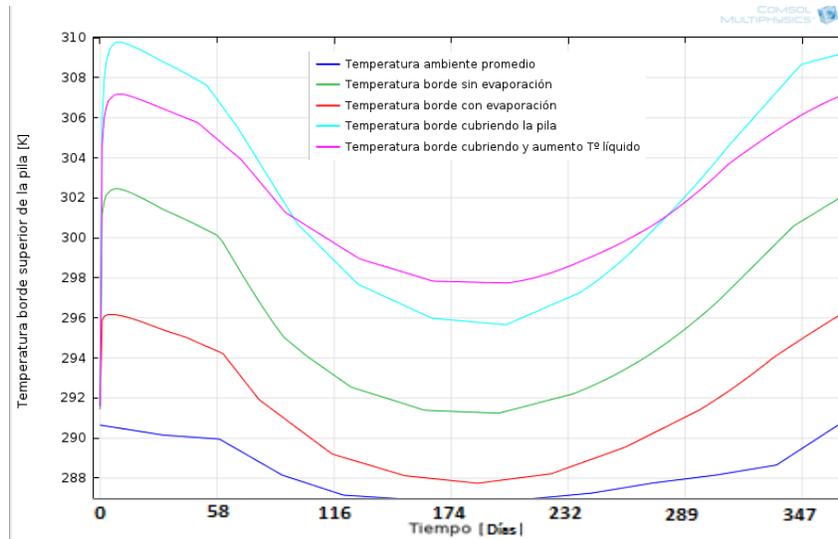


Figura 4.2-62: Caso 5 - Temperatura ambiente y en el contorno superior

La figura anterior muestra la temperatura ambiente y la temperatura alcanzada por el contorno superior, estas temperaturas influirán directamente en la transferencia de calor superficial.

Se observa la misma tendencia que las temperaturas promedios de la pila, pero se puede deducir la razón por la cual a pesar de aumentar la temperatura en el fluido de

irrigación resta calor en verano, y es porque la temperatura en el borde al cubrir la pila (línea celeste) supera los 301,15 [K] por lo cual al entrar en contacto con el fluido se produce un enfriamiento superficial disminuyendo la temperatura del contorno.

A continuación se presentan los balances de calor en el contorno superior de la pila para los 4 casos.

En los balances se observa la radiación entrante, la convección exterior producida por el aire, la radiación emitida por la pila, la evaporación superficial y el flujo neto de calor.

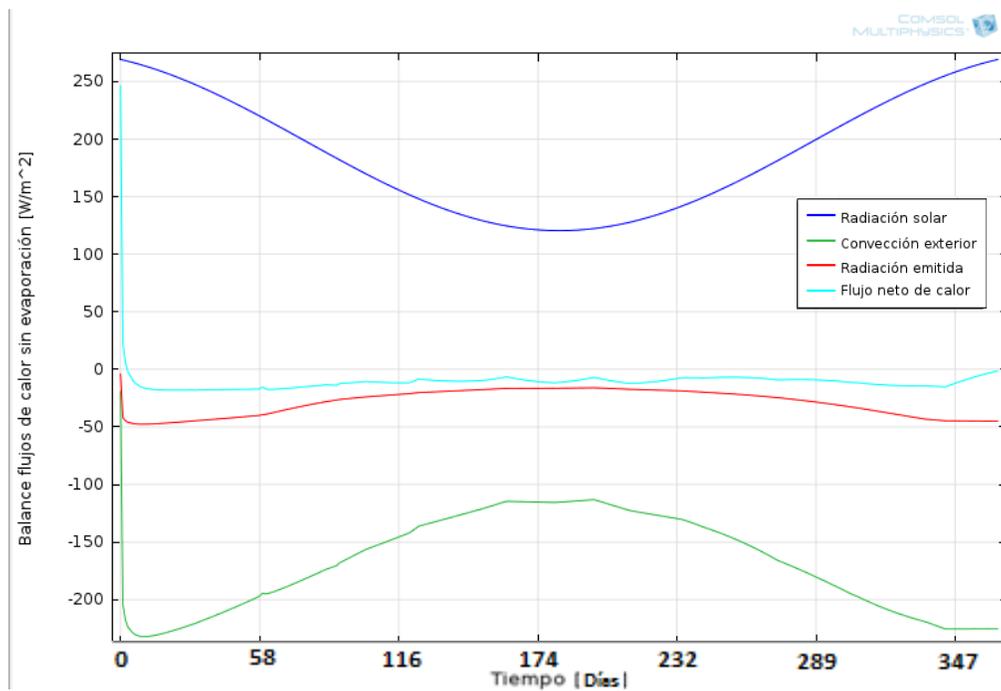


Figura 4.2-63: Caso 5 - Balance de calor en contorno superior caso "Sin evaporación"

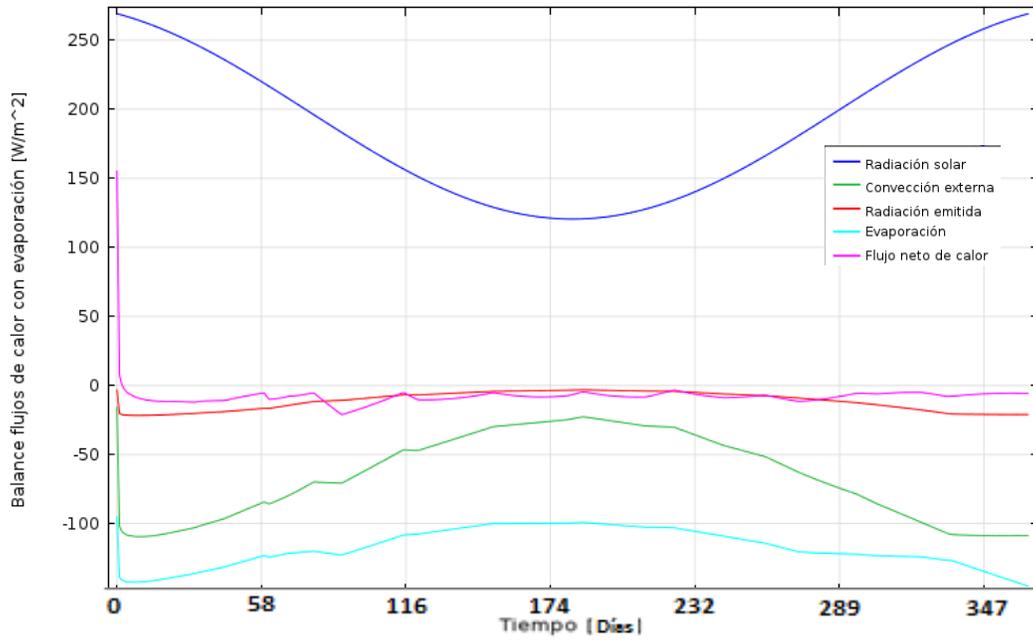


Figura 4.2-64: Caso 5 - Balance de calor en contorno superior caso "Con evaporación"

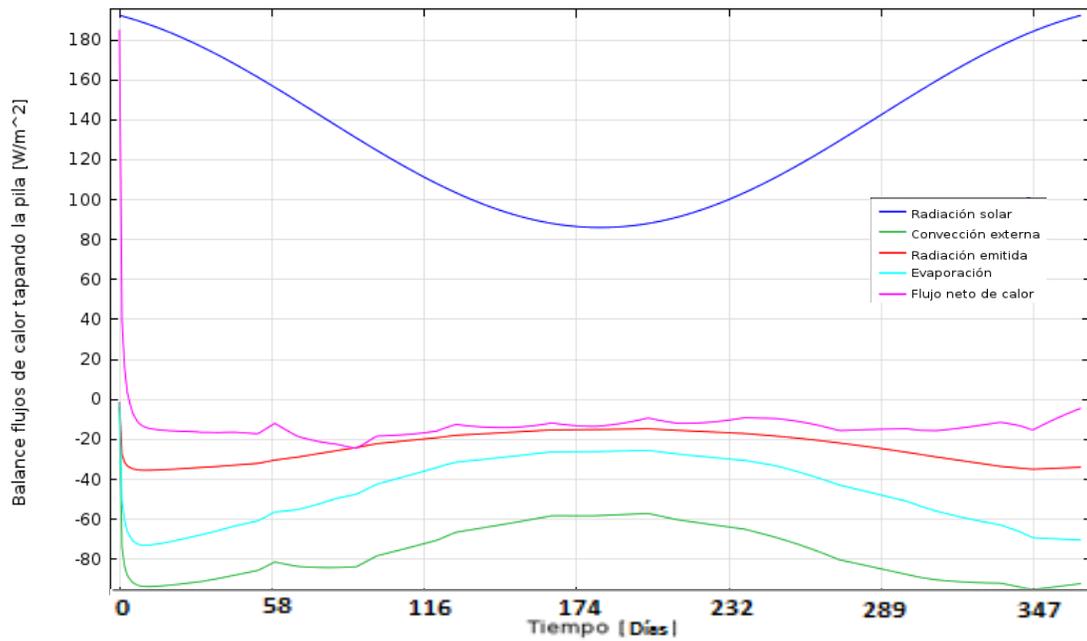


Figura 4.2-65: Caso 5 - Balance de calor en contorno superior caso "Cubriendo la pila"

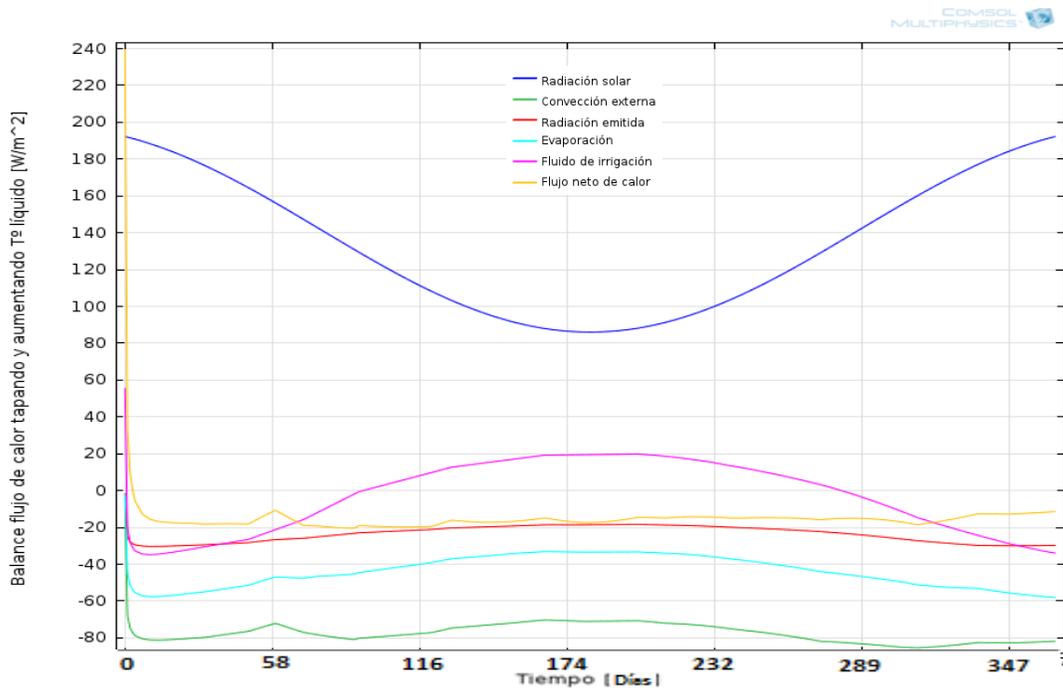


Figura 4.2-66: Caso 5 - Balance de calor en contorno superior caso "Cubriendo y aumentando temperatura de irrigación"

En los balances de calor presentados se puede observar lo siguiente:

- El balance neto siempre se mantiene negativo, lo que significa que se pierde calor a través del contorno superior.
- En la pila descubierta, la pérdida por evaporación toma relevancia sobre la convección del aire.
- Al cubrir la pila se atenúan todos los efectos ambientales, la evaporación disminuye considerablemente y vuelve a predominar la convección.
- Al aumentar la temperatura de irrigación, solo presenta ganancias de calor en invierno.

Las siguientes figuras muestran la variación de la temperatura para los puntos de evaluación al interior de la pila para 3 casos.

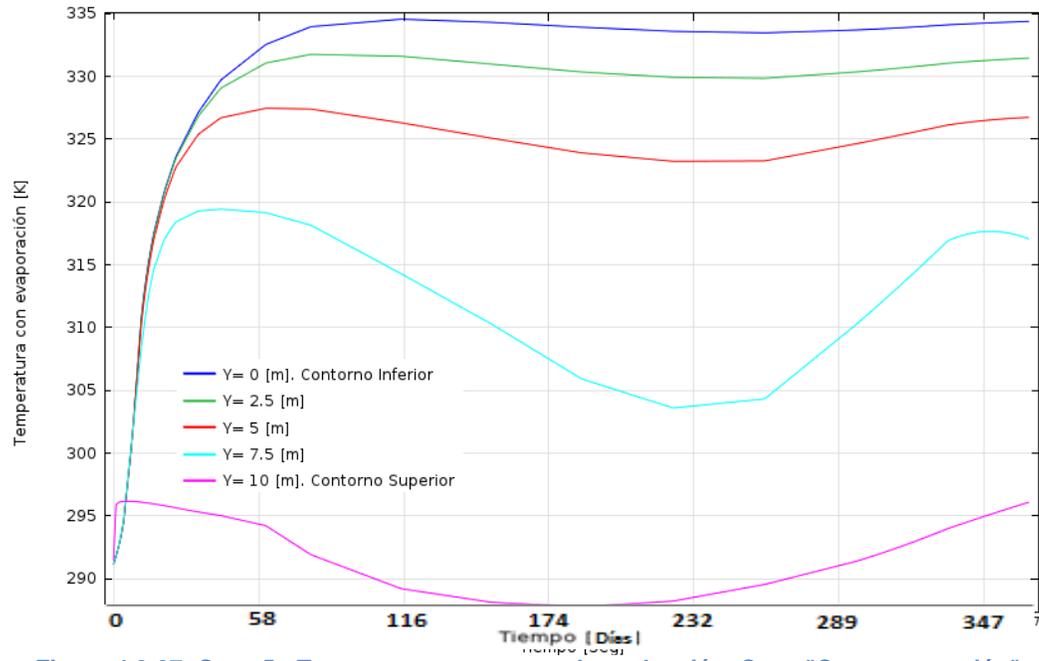


Figura 4.2-67: Caso 5 - Temperatura en puntos de evaluación. Caso "Con evaporación"

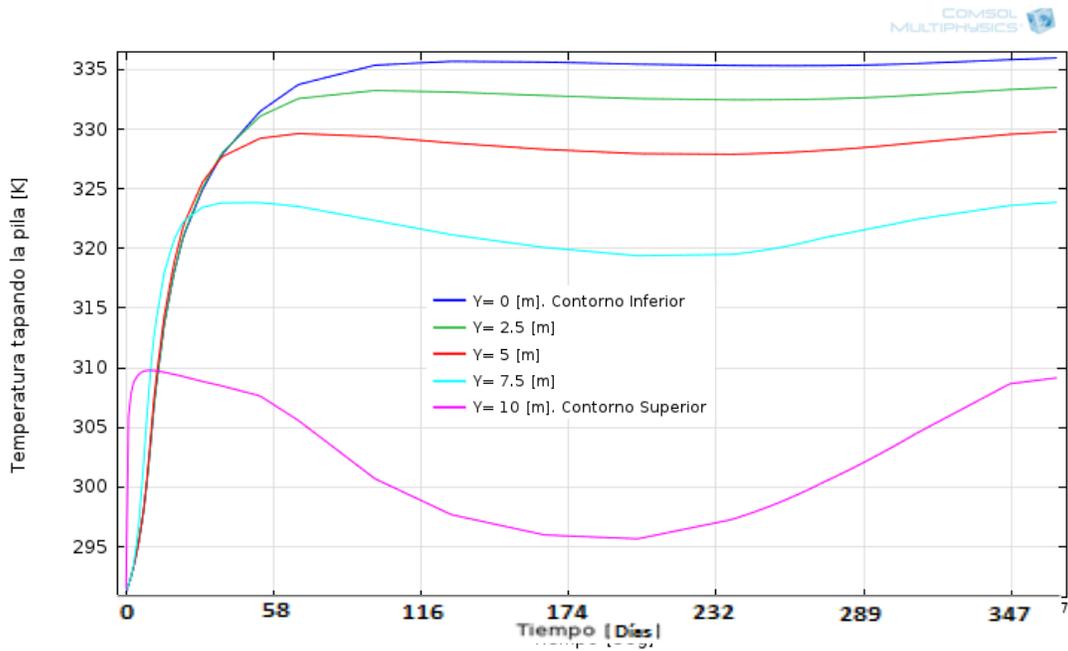


Figura 4.2-68: Caso 5- Temperaturas en puntos de evaluación. Caso "Cubriendo la pila"

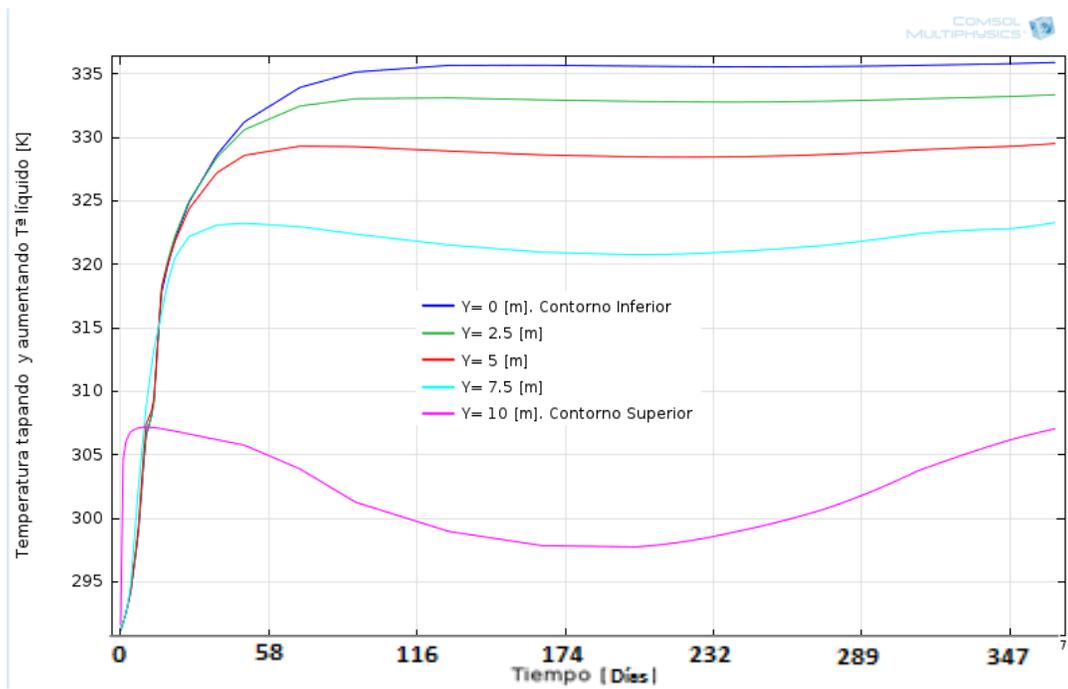


Figura 4.2-69: Caso 5 - Temperaturas en puntos de evaluación. Caso "Cubriendo la pila y aumentar T° de irrigación"

4.2.6 Caso 6 - Efecto de la concentración de oxígeno:

Se estudia el efecto del consumo de oxígeno en la pila, el cual se produce debido a las reacciones químicas y biológicas internas, esto se modela según las ecuaciones propuestas por Zambra (ecuaciones 2.28-2.30 [20]), entre otros autores, para un caso donde no hay aporte de oxígeno a través de la aireación.

Se presentan los resultados promedios obtenidos para dos casos, uno donde las condiciones ambientales se atenúan cubriendo la pila, y uno donde además de cubrir la pila se aumenta la temperatura del fluido de irrigación a 301,15 [K].

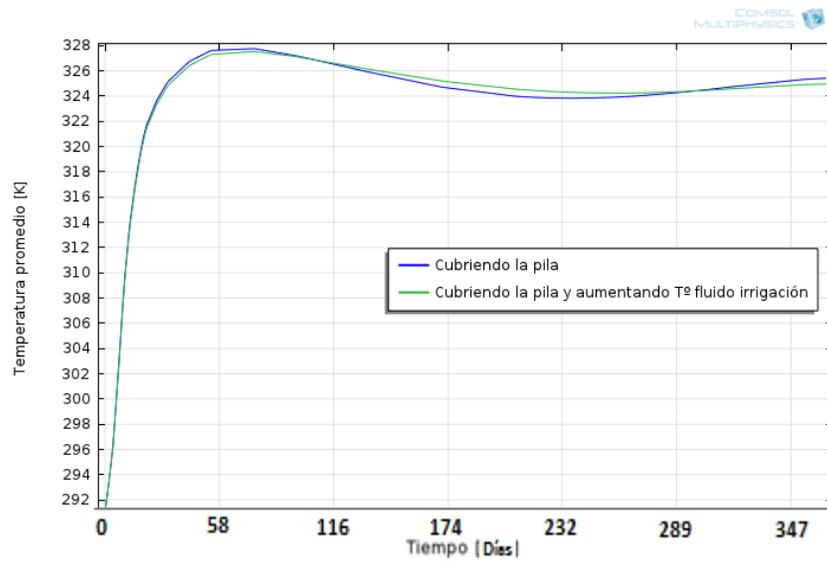


Figura 4.2-70: Caso 6 - Temperatura promedio con consumo de oxígeno

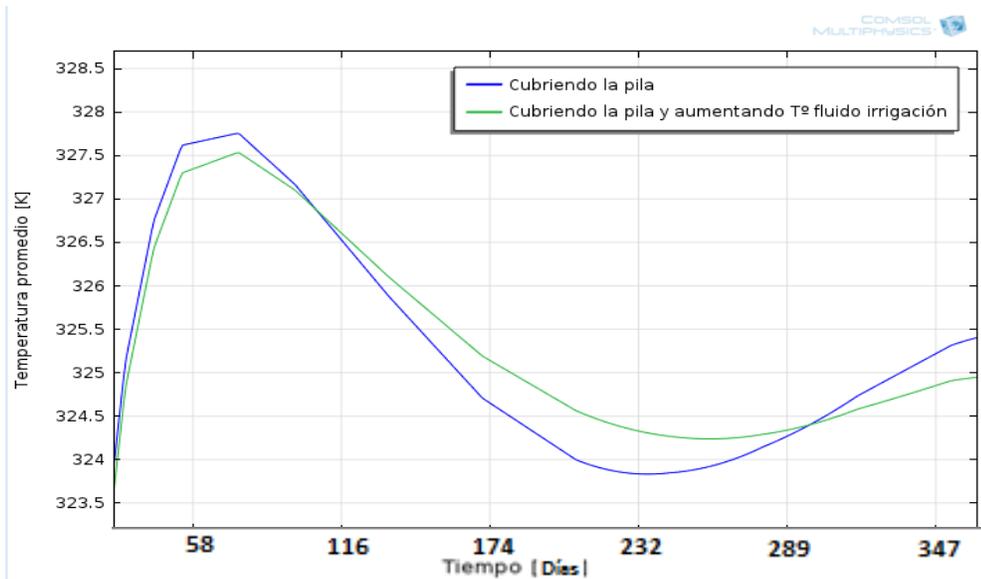


Figura 4.2-71: Caso 6 - Detalle de las temperaturas promedios con consumo de oxígeno

En la figura anterior se observa el efecto del consumo de oxígeno, ya que se alcanza un peak de temperatura promedio alrededor del día 70, de 327,75 [K], y luego comienza un descenso, tanto por la llegada del invierno como por el consumo de oxígeno, bajando la temperatura hasta los 324 [K], en la pila solo cubierta (línea azul), para luego subir solo hasta los 325,5 [K] cuando se han cumplido los 365 días.

Si se aumenta la temperatura del fluido de irrigación, se observa un comportamiento similar al ya estudiado en el caso anterior, donde se observa un leve aporte en invierno, de 0,5 [K] aproximadamente, y una disminución de la temperatura promedio en verano, alrededor de 0,3 [K].

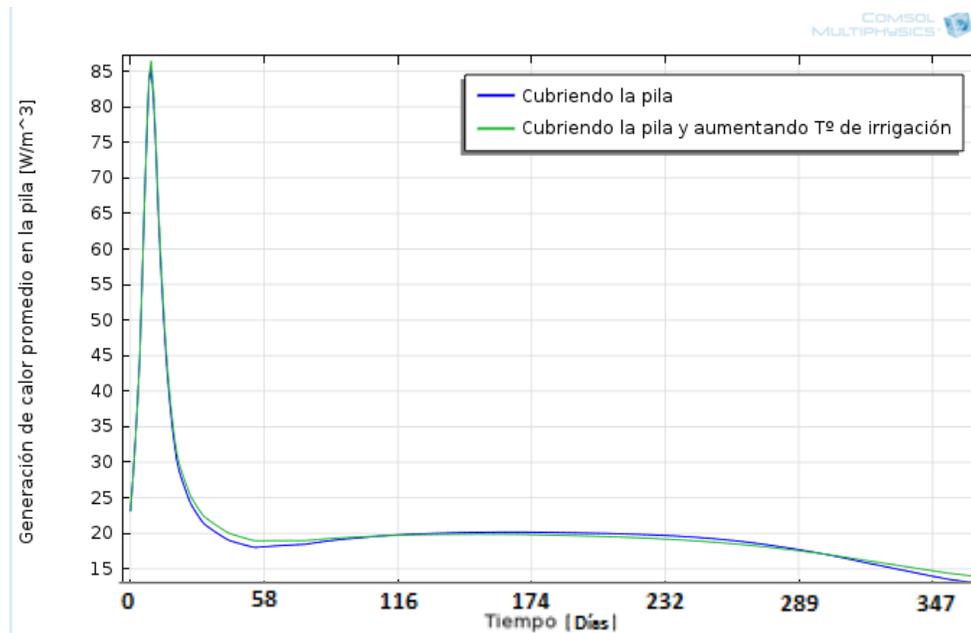


Figura 4.2-72: Caso 6 - Generación de calor promedio con consumo de oxígeno

La generación de calor lograda tiene 2 particularidades, la primera es que se alcanza una mayor generación de calor promedio en el peak, de 85 [W/m³] aproximadamente, esto debido a que en los casos anteriores se considera una concentración de oxígeno constante equivalente a 0,9 veces la concentración inicial considerada en este caso.

Además, al comparar con la generación de calor obtenida en el caso anterior (Figura 4.2-61) se observa la disminución de esta a partir del día 232, llegando por debajo de los 15 [W/m³] para el día 365.

La próxima figura muestra la concentración de oxígeno promedio en la pila.

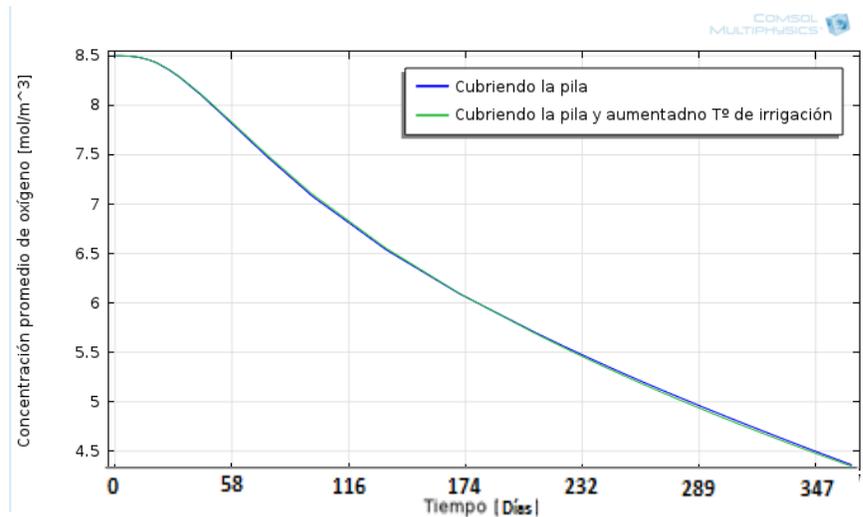


Figura 4.2-73 : Caso 6- Concentración de oxígeno promedio

Debido a la similitud entre las temperaturas alcanzadas para ambos casos, las concentraciones promedios siguen la misma tendencia.

La disminución en la concentración promedio sigue una tendencia más bien lineal, disminuyendo en un 47% durante el tiempo de simulación.

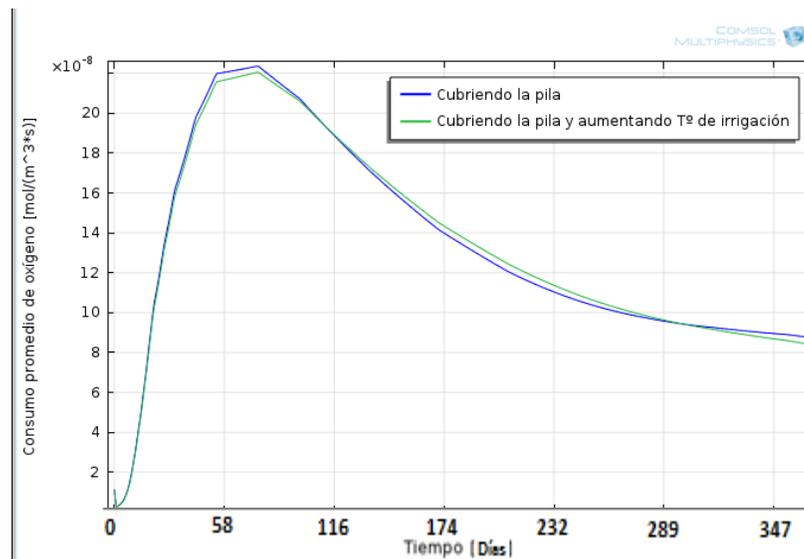
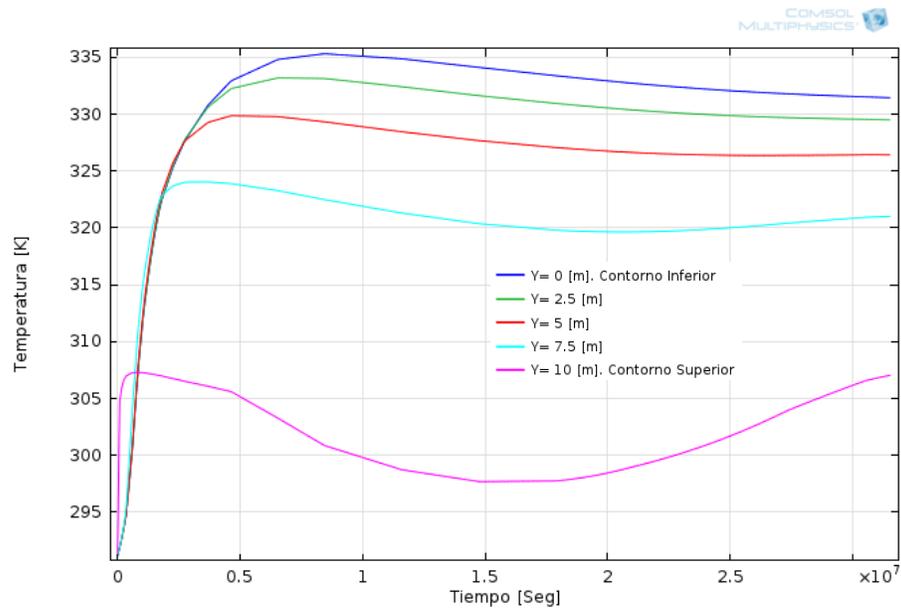


Figura 4.2-74: Caso 6 - Consumo de oxígeno promedio

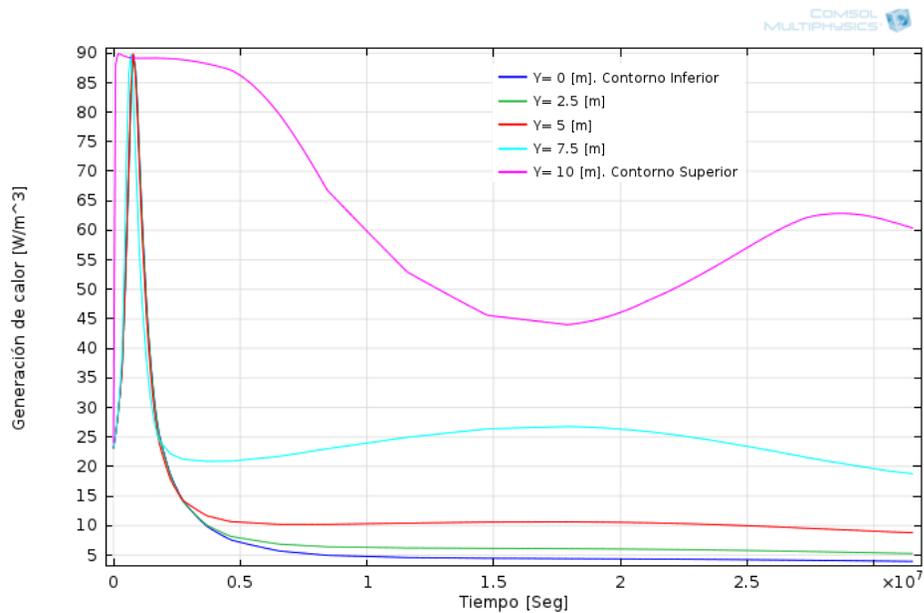
El consumo de oxígeno se relaciona con la temperatura al interior de la pila, por lo cual alcanza un peak cercano al tiempo cuando se alcanza la máxima temperatura promedio de la pila.

El máximo consumo de oxígeno es de 22×10^{-8} [mol/(m³*s)], alrededor del día 83, disminuyendo hasta los 9×10^{-8} [mol/(m³*s)] en el día 365.

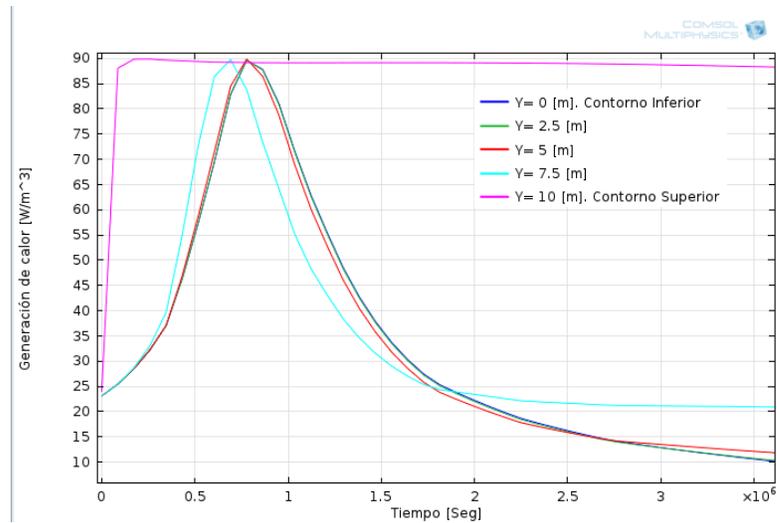
En las siguientes figuras se muestra el comportamiento del sistema en los puntos de evaluación centrales de la pila, para el caso donde se cubre la pila junto a aumentar la temperatura del fluido de irrigación a 301,15 [K].



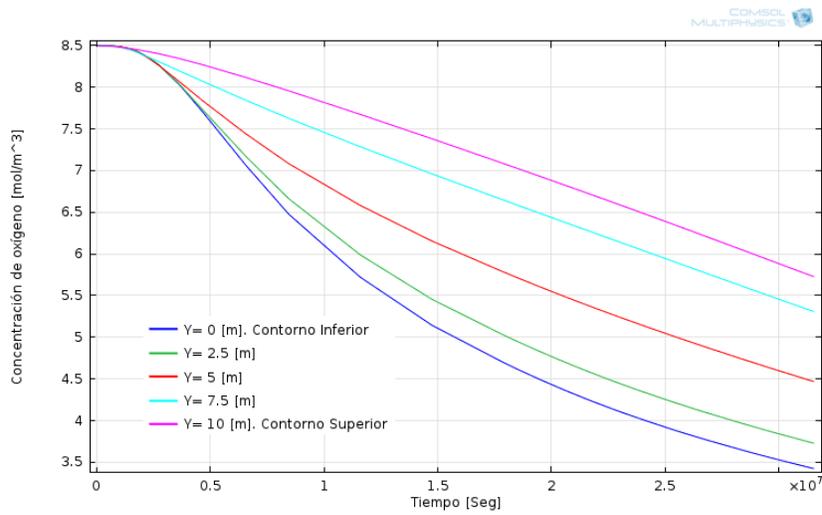
4.2-75: Caso 6 - Temperaturas en puntos de evaluación, con consumo de oxígeno



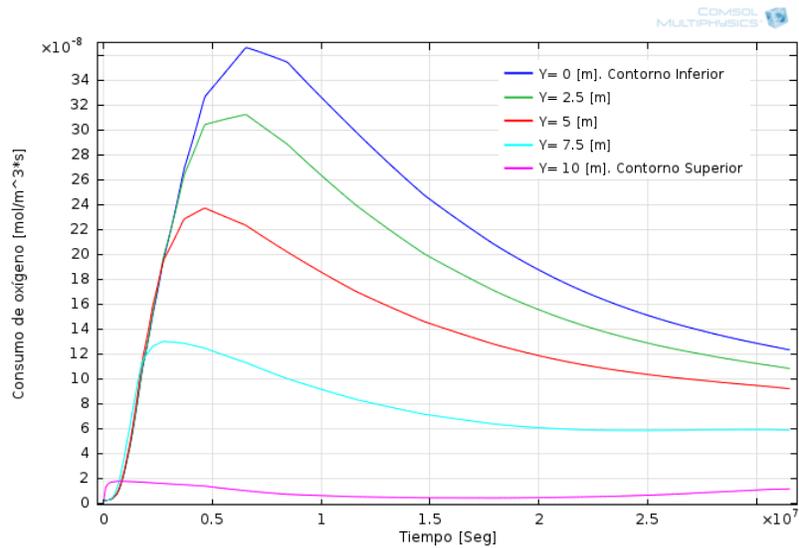
4.2-76: Caso 6 - Generación de calor en puntos de evaluación, con consumo de oxígeno



4.2-77: Caso 6 - Detalle generación de calor en puntos de evaluación



4.2-78: Caso 6 - Concentración de oxígeno en puntos de evaluación

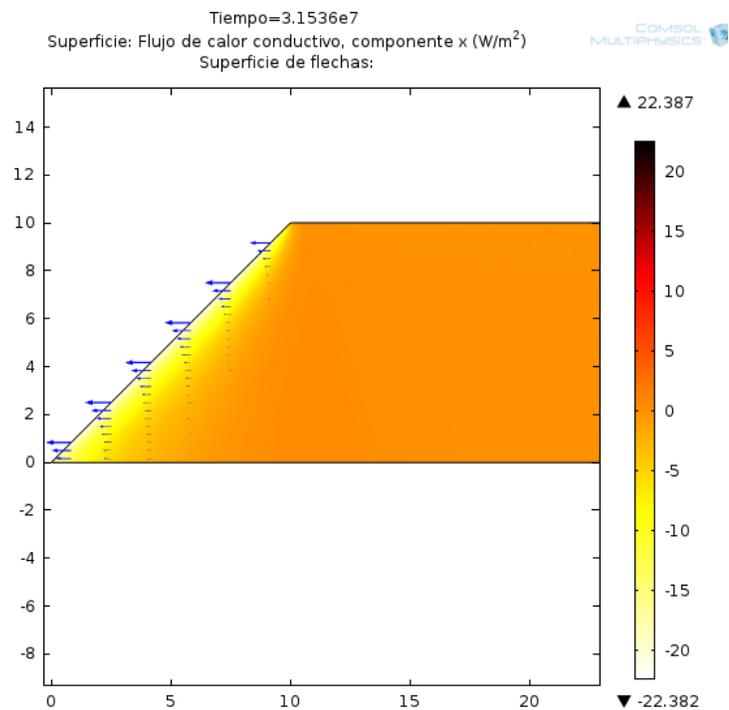


4.2-79: Caso 6- Consumo de oxígeno en puntos de evaluación

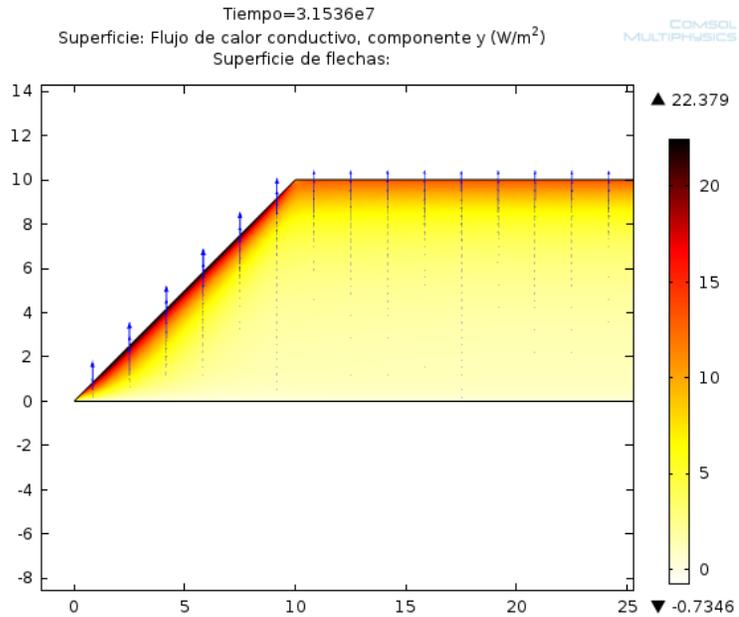
Antes de presentar los contornos de temperatura y concentración de oxígeno en la pila, se analizará la influencia de la convección y conducción al interior de la pila, según su dirección. Dado que este es un análisis 2D los flujos de calor tendrán unidades de W/m^2 .

Las siguientes figuras presentan un campo de flechas para graficar la dirección y la magnitud del flujo, pero se debe tener en cuenta que los vectores del campo conductivo están ponderados por un factor de escala de 0,05, mientras que los del campo convectivo por uno de 0,001. Esto se realiza con el fin de que los vectores sean visibles en la figura y muestra, además, como los valores del campo convectivo son mucho más grandes que los del conductivo.

Este análisis se realiza solo para el último día de la simulación, ya que es similar para el resto del año y para la mitad de la pila ya que los resultados son simétricos.

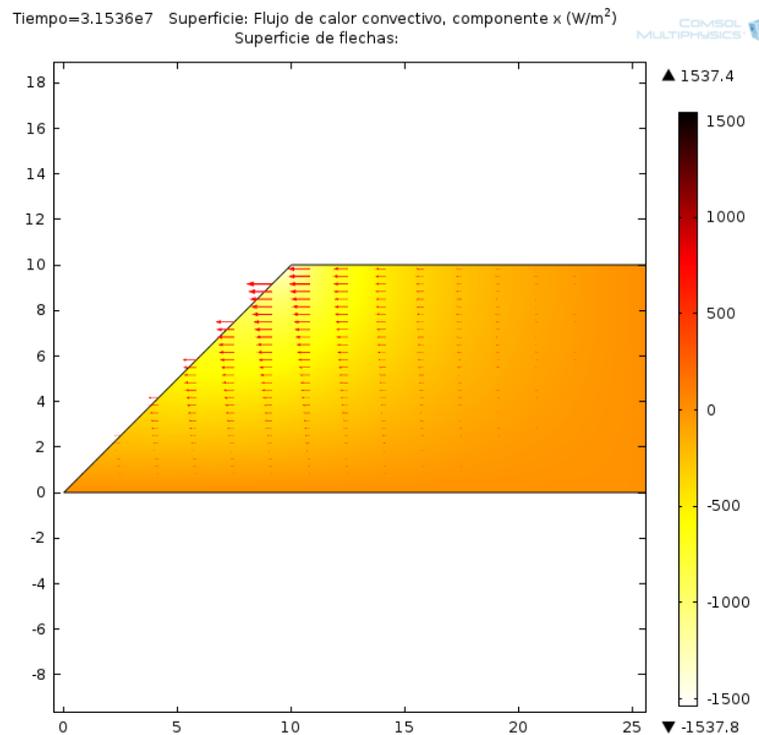


4.2-80: Caso 6 - Flujo de calor conductivo en x

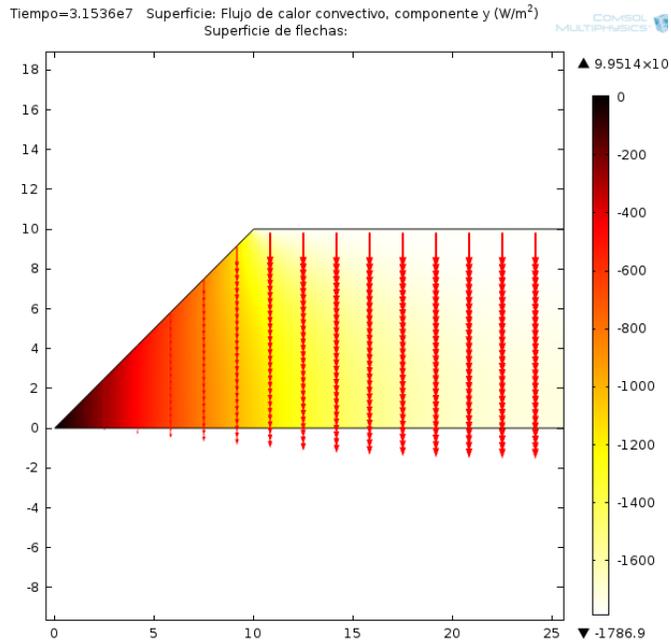


4.2-81: Caso 6 - Flujo de calor conductivo en y

En las figuras anteriores se observa que el flujo conductivo alcanza un máximo de 22,38 [W/m³] en las dos direcciones, los máximos se encuentran cerca de los bordes del sistema donde hay difusión de calor por los fenómenos de contorno. Para la dirección “x” en el medio de la pila la conductividad es despreciable, mientras que para la dirección y es de mayor importancia.



4.2-82: Caso 6 - Flujo de calor convectivo en x



4.2-83: Caso 6 - Flujo de calor convectivo en y

Los flujos presentados toman valores negativos o positivos según la dirección que sigan. La componente en “x” de la convección interna alcanza un valor máximo de 1537 [W/m²] en el extremo del contorno superior, debido a que el campo de velocidad alcanza mayores velocidades en “x” en aquella zona. Pero se mantiene cercano a 0 en la mayor parte de la pila.

La convección interna en “y” es la de mayor importancia alcanzando un máximo de 1787 [W/m³] en el centro de la pila. Se observa la convección en esta dirección abarca gran parte de la pila, salvo los bordes donde la velocidad del fluido desciende.

Los contornos de flujo presentados muestran que el transporte de calor a través de la convección debida al flujo de líquido en la pila domina ampliamente la transferencia térmica.

Se presentan los contornos de temperatura obtenidos para este caso.

Tiempo 86400 [seg] (1 día):

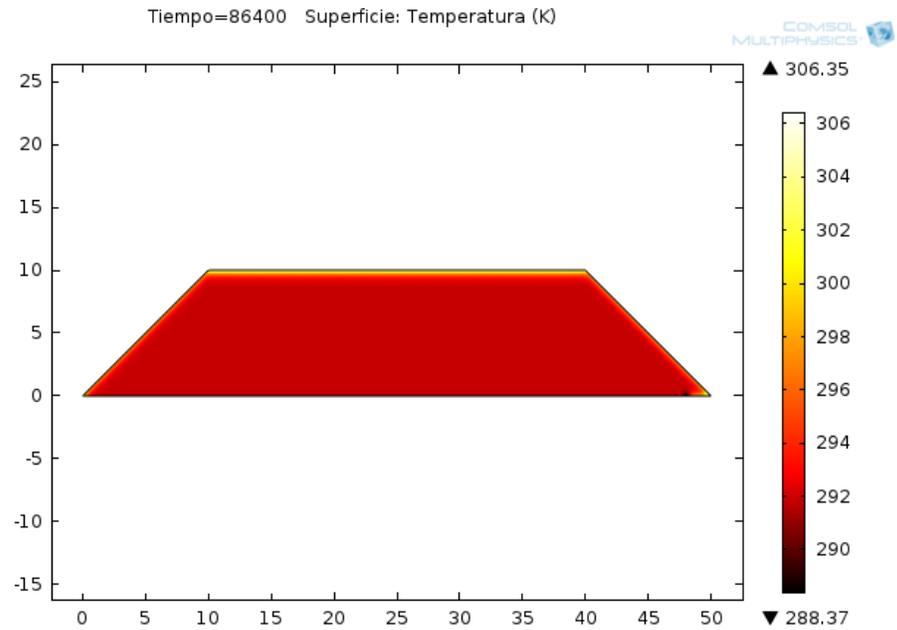


Figura 4.2-84: Caso 6 - Contorno temperatura día 1

Tiempo $4.4064 \cdot 10^6$ [seg] (51 días)

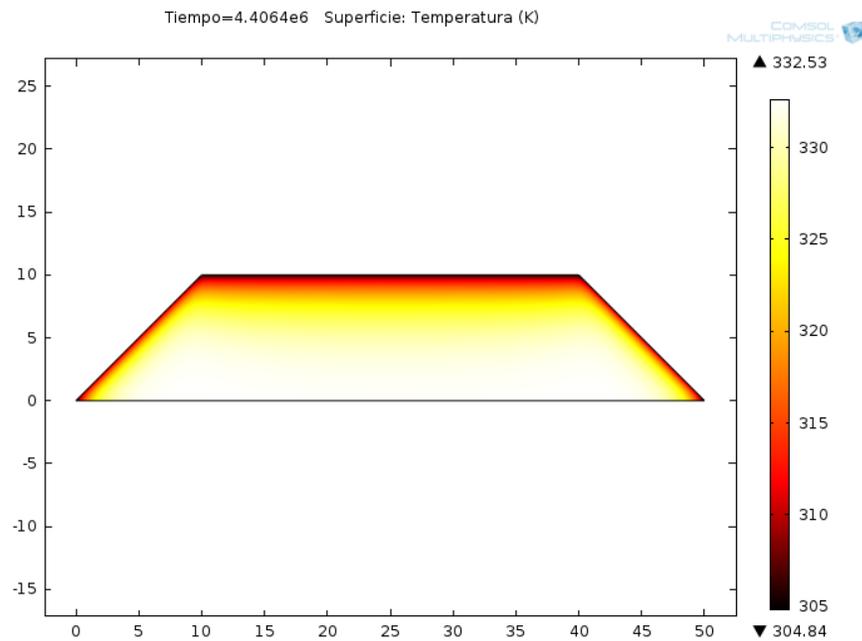


Figura 4.2-85: Caso 6 - Contorno de temperatura día 51

Tiempo 8.7264×10^6 [seg] (101 días)

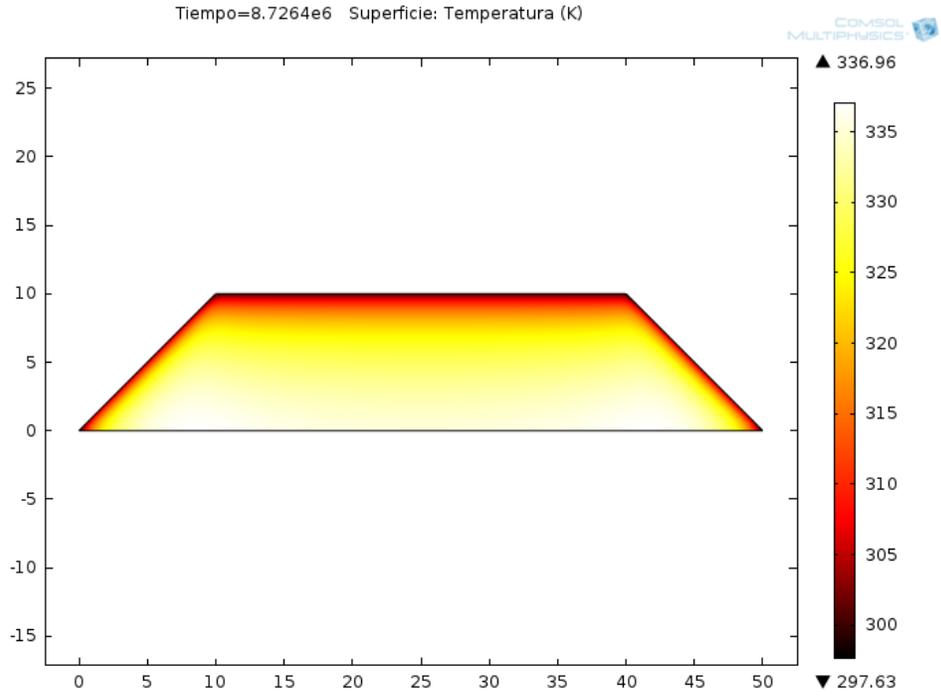


Figura 4.2-86: Caso 6 - Contorno temperatura día 101

Tiempo 1.73664×10^7 [seg] (201 días)

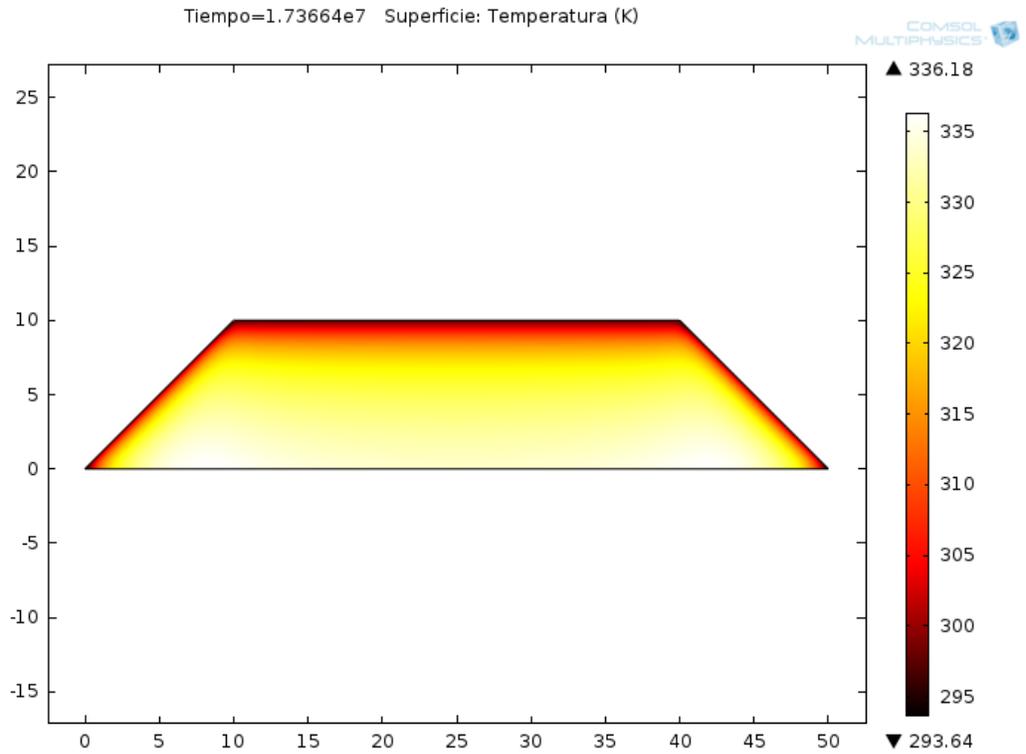


Figura 4.2-87: Caso 6- Contorno temperatura día 201

Tiempo $2.60064 \cdot 10^7$ [seg] (301 días)

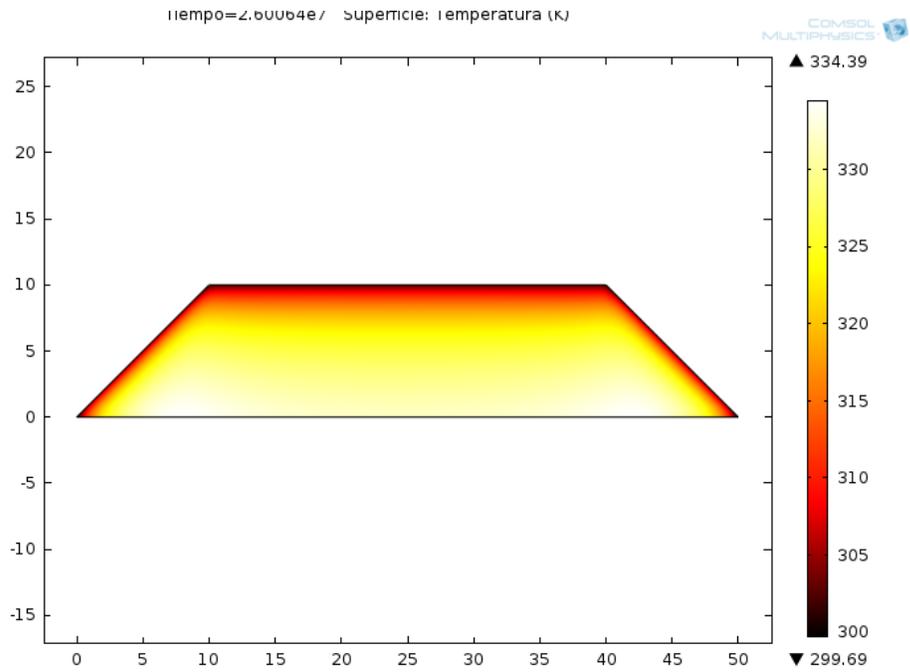


Figura 4.2-88: Caso 6 - Contorno temperatura día 301

Tiempo $3.1536 \cdot 10^7$ [seg] (365 días)

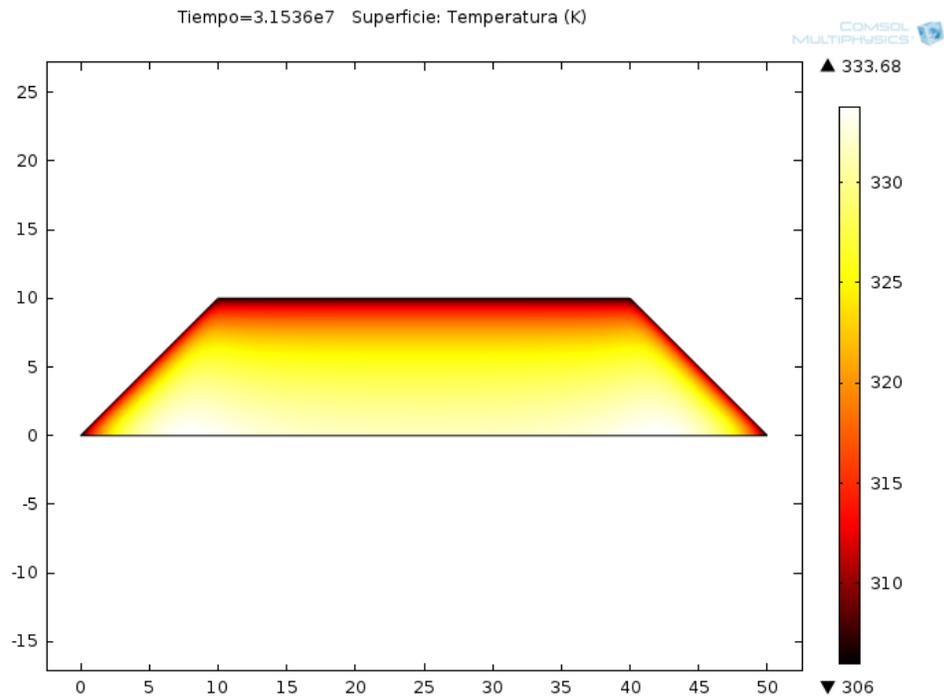


Figura 4.2-89: Caso 6- Contorno temperatura día 365

Los siguientes contornos muestran la concentración de oxígeno al interior de la pila.

Tiempo 86400 [seg] (1 día):

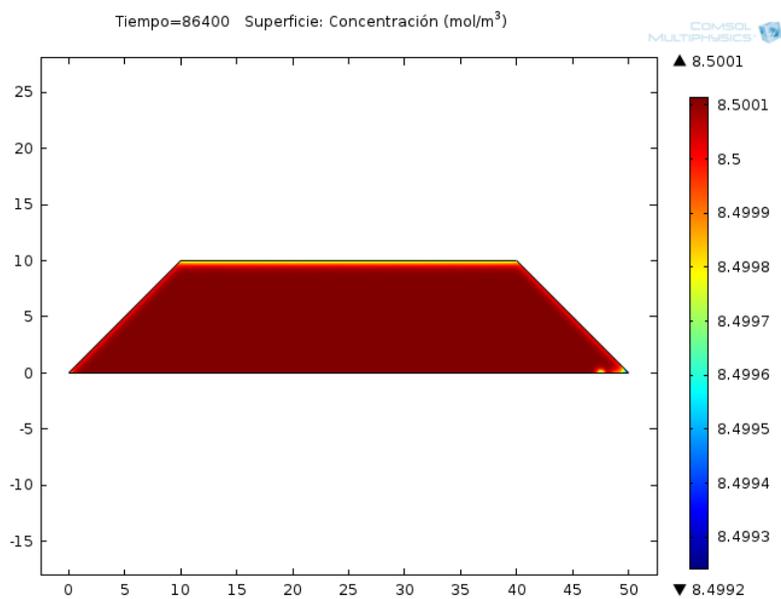


Figura 4.2-90: Caso 6 - Contorno concentración de oxígeno día 1

Tiempo $4.4064 \cdot 10^6$ [seg] (51 días)

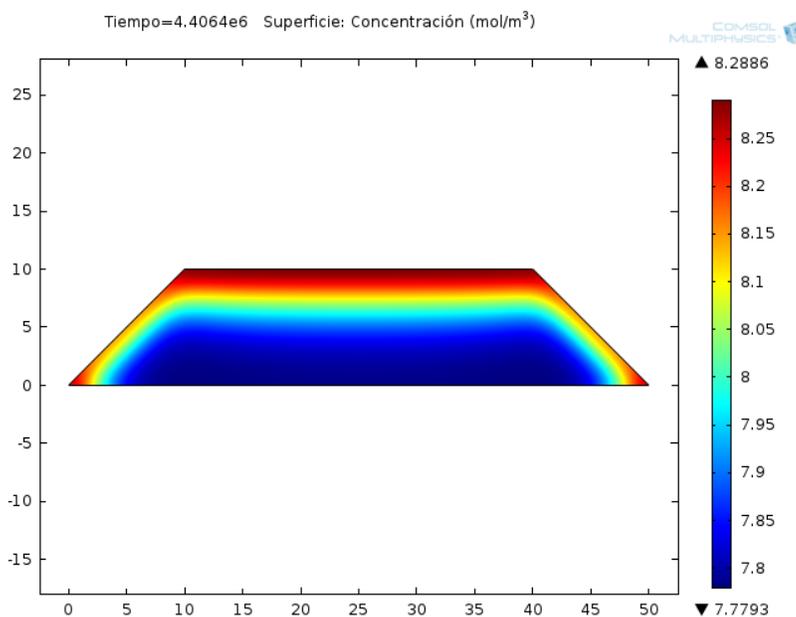


Figura 4.2-91: Caso 6 - Contorno de concentración de oxígeno día 51

Tiempo $8.7264 \cdot 10^6$ [seg] (101 días)

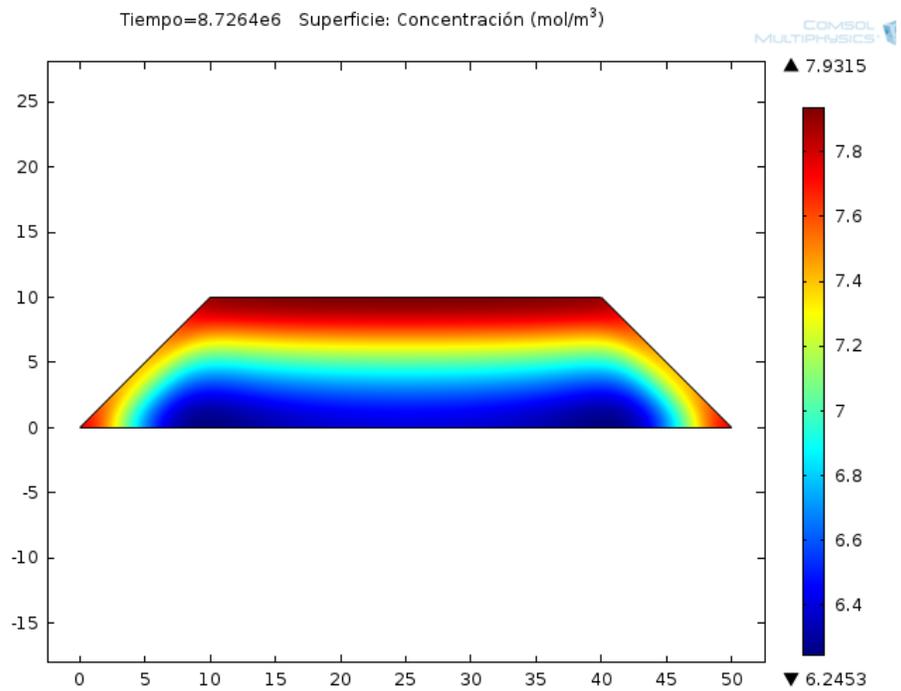


Figura 4.2-92: Caso 6 - Contorno concentración de oxígeno día 101

Tiempo 1.73664*10⁷ [seg] (201 días)

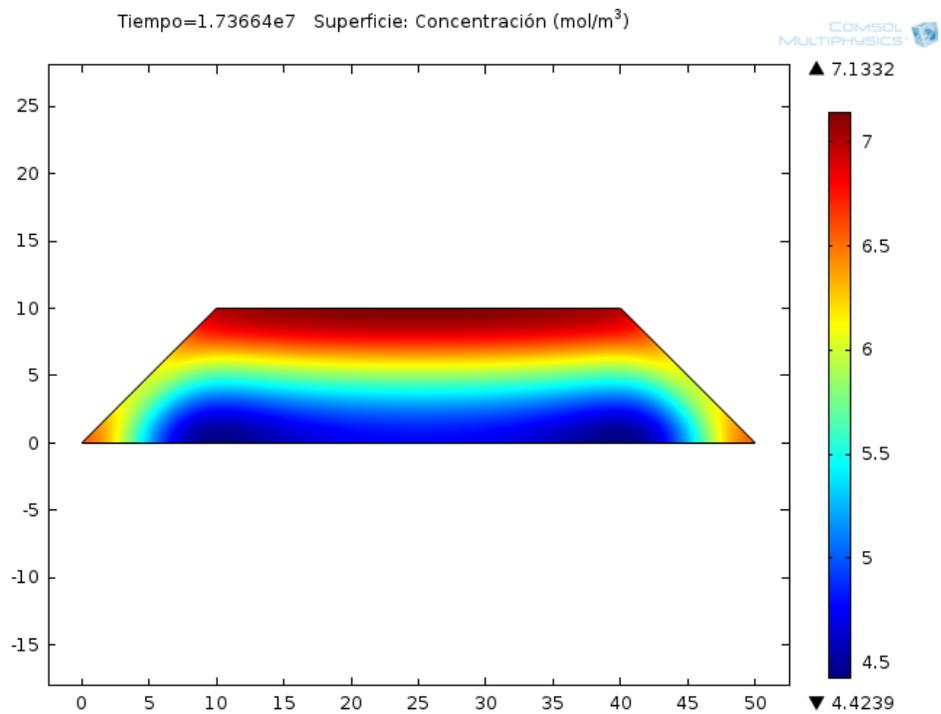


Figura 4.2-93: Caso 6- Contorno concentración de oxígeno día 201

Tiempo 2.60064×10^7 [seg] (301 días)

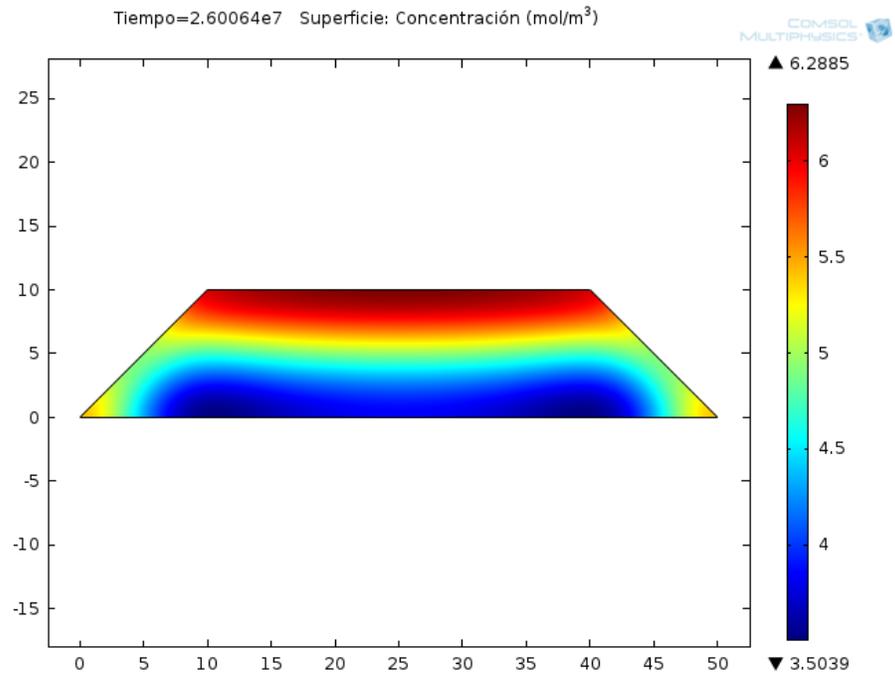


Figura 4.2-94: Caso 6 - Contorno concentración de oxígeno día 301

Tiempo 3.1536×10^7 [seg] (365 días)

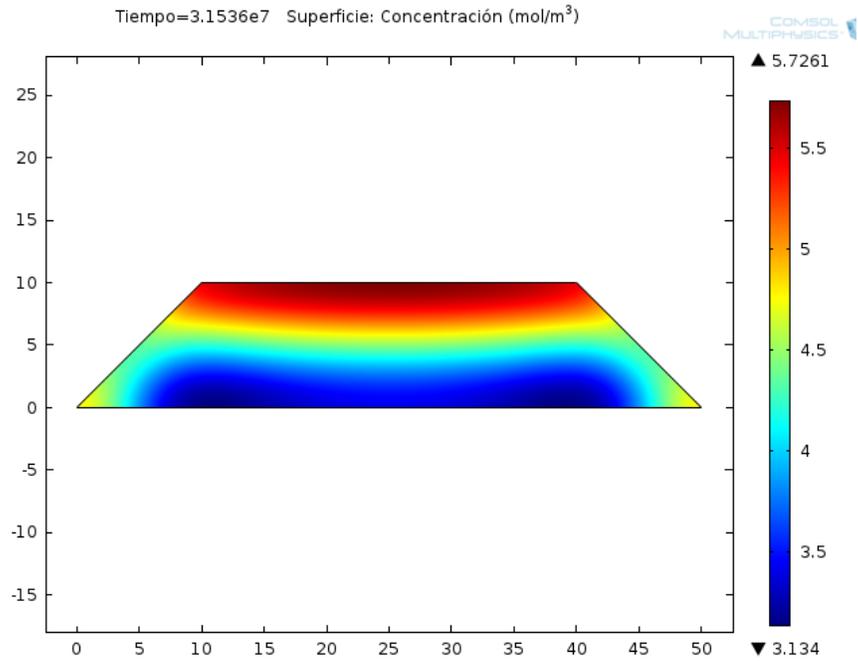


Figura 4.2-95: Caso 6- Contorno concentración de oxígeno día 365

En los contornos anteriores se observa la relación entre la temperatura y la disminución de oxígeno, ya que mientras mayor es la temperatura más rápido se consume el oxígeno disminuyendo la concentración, lo cual busca reflejar la importancia de la temperatura en los procesos internos de lixiviación.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Se presentan las conclusiones de esta memoria, las cuales nacen a partir de la experiencia adquirida durante el trabajo, los resultados obtenidos y la discusión sobre los mismos.

El objetivo principal consistía en estudiar el comportamiento térmico del sistema, a través de un modelo matemático y simulaciones termo-fluidodinámicas, por lo cual se dividen las conclusiones en estos temas.

5.1 Conclusiones sobre el modelo matemático:

Para abordar el modelo se consideró un sistema físico dado por un medio poroso, la pila de biolixiviación, el cual se irriga por el borde superior con un fluido lixivante, mientras que en el borde inferior se ingresa aire con el fin de mantener la pila oxigenada, además se tiene una generación de calor volumétrica debido a las reacciones químicas y biológicas, y la pérdida de calor en los bordes del sistema debido a factores ambientales como la evaporación y la convección del aire.

Del estudio realizado sobre transferencia de calor y mecánica de fluidos en medios porosos, en conjunto con lo reportado en la literatura para modelar pilas de lixiviación y sistemas similares como pilas de compost, se describe un modelo matemático que relaciona la ecuación de la energía con el flujo de fluidos, la difusión de oxígeno y la generación de calor asociada a las reacciones internas de la pila.

El flujo al interior de una pila de biolixiviación es bifásico, considerando la irrigación, fase líquida, y la aireación, fase gaseosa. Este flujo se modela a través de la Ley de Darcy modificada, la cual incluye la permeabilidad relativa siendo esta una medida adimensional, entre 0 y 1, que cuantifica la posibilidad de fluir de una fase con respecto a la otra debido que la presencia de más de un fluido inhibe el flujo..

A través de estas ecuaciones se obtienen las velocidades de las fases en el medio las cuales determinarán la convección interna del sistema.

La ecuación de la energía presentada se basa en la suposición de equilibrio térmico local, la cual ha sido utilizada por diversos autores para tratar la transferencia de calor en este tipo de medio ([16, 17, 18, 19, 20]). Las principales características de esta ecuación es trabajar con propiedades efectivas que relacionan la conductividad térmica, la densidad y el calor específico de las fases con su fracción volumétrica en el medio, además considera la convección debido a los fluidos de aireación e irrigación, las pérdidas por evaporación y las ganancias por generación de calor.

Se debiese estudiar las condiciones específicas que se deben cumplir para obtener un equilibrio térmico local ya que en caso contrario se debe utilizar una ecuación de la energía para cada fase. Se sabe que la diferencia de temperatura entre fases depende de

los parámetros morfológicos del medio poroso y de las propiedades termofísicas del sólido y del fluido. [36].

Uno de los parámetros más importante del modelo es la generación de calor. Se sabe que los procesos de biolixiviación son en gran parte exotérmicos, lo cual aumentará la temperatura del sistema. Para este trabajo se han utilizado las ecuaciones presentadas por Zambra [20], entre otros autores, las que relacionan la generación de calor con una función del tipo Arrhenius en función de la temperatura, siendo esta la que finalmente determinará la generación de calor en el sistema.

Se sabe que las reacciones al interior del medio dependen en buena medida de la temperatura, especialmente los procesos biológicos los cuales tienen una temperatura óptima de trabajo variando considerablemente su eficacia al salir de este rango.

La generación de calor también depende de la concentración de oxígeno en el medio, por esto es necesaria una adecuada aireación. Se presenta una ecuación de difusión de oxígeno en medios poroso, utilizando un coeficiente de difusión efectivo y un término de consumo de oxígeno debido a las reacciones internas.

Para mayor precisión en la generación de calor real del sistema se debiesen considerar parámetros químicos y ecuaciones de transporte para varias especies, como los iones ferrosos y férricos, la cantidad de bacterias, entre otros, con los cual se conocerán las tasas de reacción y en conjunto con las entalpías de reacción se determinará la generación de calor total.

5.2 Conclusiones sobre las simulaciones termo-fluidodinámicas:

Las simulaciones realizadas corresponden a una simplificación del modelo físico-matemático previamente presentado, considerando un:

- Sistema bifásico, medio poroso (pila) y fluido de irrigación (líquido).
- Medio poroso saturado volumétricamente en líquido de irrigación.
- Modelo en 2 dimensiones (2D).

Lo anterior permite que la permeabilidad relativa sea 1, pudiendo utilizar la ley de Darcy en su forma general. Estas simplificaciones fueron adoptadas debido a los tiempos y recursos computacionales disponibles para esta memoria, tiempos que no eran suficientes para abarcar un sistema de mayor complejidad.

Las simulaciones son en estado transiente con pasos de tiempo de 1 día en un periodo de evaluación de 1 año, que es el tiempo promedio que demora el proceso de lixiviación en terreno.

Se realizaron diferentes casos con el fin de estudiar los fenómenos de interés, como características generales se considera un corte transversal de la pila con 10 [m] de altura, 50 [m] de base inferior y talud 1:1, una tasa de irrigación de 5 [L/(m²hr)], una porosidad de 0,459 y permeabilidad de $6,23 \cdot 10^{-11}$ [m²], características del fluido de irrigación igual a las del agua, además de la convección del aire como fenómeno de contorno.

Los datos físicos y térmicos de la pila se obtuvieron desde lo reportado por diversos autores, pudiendo estos variar de una pila a otra, por ejemplo, la porosidad y

permeabilidad dependerá de la granulometría, de las etapas de aglomeración y el apilamiento del mineral, por lo cual estos parámetros deben ser medidos experimentalmente para cada pila.

A través de la Ley de Darcy se obtuvo un campo de velocidad acorde a lo reportado en la literatura, del mismo orden de magnitud de 10^{-6} [m/s], siendo la velocidad promedio de $1,075 \cdot 10^{-6}$ [m/s], mientras que al centro de la pila se alcanzan $1,296 \cdot 10^{-6}$ [m/s]. Los bordes del sistema tienen las velocidades mínimas por lo cual presentarán menores tasas de lixiviación. Las principales diferencias entre las velocidades encontradas en la literatura, se pueden deber a la porosidad, la permeabilidad absoluta y relativa consideradas en los estudios.

Para la transferencia de calor se estudiaron 6 casos variando aspectos que influirán en la temperatura alcanzada por la pila, esto permitió lograr una mayor comprensión del comportamiento térmico del sistema.

El Caso 1 considera un contraste para diferentes generaciones de calor, observándose que ha mayor generación posible, mayor es la temperatura alcanzada, siendo la generación de calor el parámetro más influyente para lograr altas temperaturas en una pila de biolixiviación.

Este caso también tuvo por fin escoger una función de generación de calor adecuada al problema, que permitiese rangos de generación y temperatura realistas, estando en el orden de magnitud reportado. Finalmente, la función escogida (Figura 3.2-5) presenta un máximo de $81 \text{ [W/m}^3\text{]}$, que se da a los 306 [K]

Con esta generación la pila alcanza un estado estable a una temperatura promedio de $321,5 \text{ [K]}$. Partiendo desde un estado inicial de $289,15 \text{ [K]}$ la temperatura aumenta rápidamente hasta el día 58 alcanzando los 320 [K] promedio, pero no se logra el equilibrio sino hasta el día 116. Es decir, desde que comienza a operar la pila no se logrará una alta temperatura hasta superado el estado transiente, que en este caso corresponde a $1/6$ del tiempo de operación de la pila (365 días), aproximadamente. Por otro lado se debe tener en cuenta esta evolución de la temperatura para diseñar estrategias de inoculación con diferentes tipos de bacterias.

Los contornos de temperatura obtenidos, muestran como los bordes del sistema se mantienen a baja temperatura por el efecto de la convección del aire, la temperatura aumenta hacia el interior de la pila dado que la difusión de calor es más lenta. Se observan 2 “puntos calientes” cercano a los bordes del contorno inferior, donde se logran las máximas temperaturas, los cuales se producen debido a las menores velocidades de fluido en esos puntos, enfriando más lentamente ese sector.

En cuanto a la generación de calor promedio, se observa un peak cercano al día 25, lo cual se produce debido al rápido aumento en la temperatura, alcanzando en gran parte de la pila la temperatura de 306 [K] , donde la generación es máxima. Luego la generación comienza un descenso mientras la temperatura aún aumenta hasta alcanzar un estado de equilibrio, donde la difusión de calor se iguala a la generación de calor. Este comportamiento se compara con un estudio experimental verificándose la consistencia de los resultados.

En el Caso 2 se varía el tamaño de la pila, donde al aumentar el tamaño de la pila al doble la temperatura promedio aumenta en 10 [K], lográndose un aporte moderado y siendo el segundo factor más importante en la temperatura alcanzada por la pila.

Al considerar una pila de 5 [m] de altura y base inferior de 25 [m] la temperatura promedio alcanzada es de 311,5 [K] mientras que para la de 20 [m] de altura y 100 [m] de base inferior, la temperatura alcanza los 331 [K] promedio, considerando la misma función de generación de calor. Esta diferencia es principalmente por la dificultad en la difusión de calor del sistema, al aumentar el tamaño la pérdida de calor por los bordes tiene menor influencia.

El aumentar el tamaño de la pila puede traer problemas en la aglomeración del material, disminuyendo la permeabilidad de la pila, además dependerá de los tiempos necesarios para lixiviar aquel material y de la capacidad de la minera.

En el Caso 3, se estudia la tasa de irrigación donde al aumentarla al doble disminuye la temperatura promedio entre 7,5 [K] y 10 [K], lo cual perjudicará la acción de los microorganismos, pudiendo aumentar los tiempos de lixiviación de sulfuros, esto se produce debido a que el aumento de velocidad del fluido aumenta la capacidad de difusión de calor en el medio, favoreciendo el enfriamiento.

Al aumentar la tasa de irrigación al doble también lo hacen las velocidades al interior de la pila, aumentando la convección interna. Con una tasa de 2,5 [L/hm²] la temperatura promedio es de 329 [K], con una de 5 [L/hm²] se disminuye a 321,5 [K] y con una de 10 [L/hm²] solo se llega a 311 [K] promedio.

A pesar de que el campo de flujo al interior de la pila es una simplificación del caso real, se observa que tiene una gran influencia en la temperatura que alcanzará el medio. Por lo cual se debiese poner énfasis en lograr un campo convectivo favorable para mantener las temperaturas. En otros estudios ([31]) se ha observado que una relación de 2/3 entre la tasa de aireación y la de irrigación mantiene un campo convectivo adecuado para mantener altas temperaturas. También se considera conveniente llevar la irrigación a la menor posible y aumentar la aireación. [31].

El Caso 4, estudia el efecto de aumentar la temperatura del fluido de irrigación, siendo un fenómeno de gran interés a evaluar ya que se han realizado diversos estudios de plantas térmicas para este fin, ya sea por medio de combustibles fósiles, de energía solar o incluso geotérmica ([10, 11]), pero no se han considerado los verdaderos beneficios que pueda traer en una pila de lixiviación en terreno.

Aumentar la temperatura del fluido de irrigación en 10 [K] logra aumentar la temperatura promedio de la pila en 2 [K], lo cual puede ser despreciable considerando los costos de elevar la temperatura del líquido.

Las temperaturas de ingreso del fluido fueron de 291,15 [K], 301,15 [K] y de 311,15 [K] con las cuales se obtuvieron temperaturas promedio de 322 [K], 324 [K] y de 325,5 [K], respectivamente. Esto sin considerar que al aumentar la temperatura del fluido aumentarán las pérdidas por evaporación lo cual debe ser minimizado cubriendo la pila con una lámina de polietileno de alta densidad (HDPE), utilizando aspersores especiales o incluso enterrando los aspersores.

En el Caso 5, se agregan los efectos ambientales variables que tendrán lugar para una pila en terreno, por lo cual se escoge una zona al norte de Chile donde se consideran los ciclos anuales en la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la radiación solar.

Al tener la pila descubierta la mayor pérdida de calor es por evaporación, seguida por la convección del viento, al cubrir la pila todos los fenómenos de contorno se atenúan aumentando la temperatura promedio en 3 [K] en verano y 5,75 [K] en invierno, es decir, cubrir la pila genera un leve aporte al sistema.

Teniendo la pila descubierta la temperatura promedio en verano es de 324 [K], mientras que en invierno es de 319,5 [K]. Al cubrir la pila estas temperaturas aumentan a 327,15 [K] y 325,25 [K], respectivamente.

Si además de cubrir la pila, se aumenta la temperatura del fluido de irrigación a 301,15 [K], la temperatura promedio disminuye en verano y en invierno aumenta en 0,85 [K] lo cual vuelve a mostrar lo inútil de esta operación.

En cada caso se observa la estacionalidad de la temperatura siendo más alta en verano y disminuyendo en invierno.

En el Caso 6 se agrega la difusión de oxígeno a la función de generación de calor, con un término que simula el consumo de oxígeno debido a los procesos internos de la pila, lo cual disminuirá la generación de calor y por ende disminuirá la temperatura del sistema.

Al considerar la pila cubierta, la máxima temperatura promedio alcanzada es de 327,75 [K] al día 70 aproximadamente, luego se observa una disminución de la temperatura correspondiente al invierno donde se llega a los 323,8 [K], para luego volver a aumentar por la llegada del verano pero solo hasta los 325,5 [K]. La concentración de oxígeno varía desde la condición inicial de 8,5 [mol/m³] a 4,4 [mol/m³] al año.

Por último, se considera que los fenómenos de mayor importancia en la transferencia de calor en una pila de biolixiviación son la generación de calor volumétrica que se pueda alcanzar debido a las reacciones químicas y biológicas del medio, la cual será fuertemente dependiente de la temperatura, favoreciendo el crecimiento de diferentes tipos de microorganismo según la temperatura a la que se encuentren.

En cuanto a la convección y conducción al interior de la pila, se verifica que la convección es el modo de transporte de calor más importante, dominando la difusión de calor en el medio, por lo que al aumentar la tasa de irrigación el sistema se enfría.

Por lo anterior, se debe estudiar y lograr un campo convectivo adecuado al interior de la pila, relacionando la tasa de aireación con la de irrigación para un caso real. Si esto no se logra los demás beneficios que pueden traer cubrir la pila o aumentar la temperatura de irrigación probablemente sean insuficientes y no factibles económicamente.

Al aumentar el tamaño de la pila también se logra una mayor temperatura, pero su tamaño dependerá de su estabilidad física, el área disponible o los costos de apilamiento con respecto a la altura.

5.3 Recomendaciones:

Las principales recomendaciones para futuros trabajos o extensiones de este serían:

- Incorporar el modelo de flujo bifásico inmisible en medios porosos con saturación variable, considerando la irrigación y la aireación.
- Determinar los parámetros físico-químicos que afectan la generación de calor, y lograr un modelo de generación de calor que los incorpore.
- Incorporar al modelo de generación de calor los beneficios de la inoculación de bacterias y como éstas reaccionan a diferentes temperaturas.
- Estudiar la suposición de equilibrio térmico local entre las fases.
- Estudiar pilas no homogéneas e isotrópicas.
- Realizar estudios con pilas experimentales en terreno, midiendo temperatura y velocidades de reacción, entre otros, para calcular la generación de calor.

BIBLIOGRAFÍA

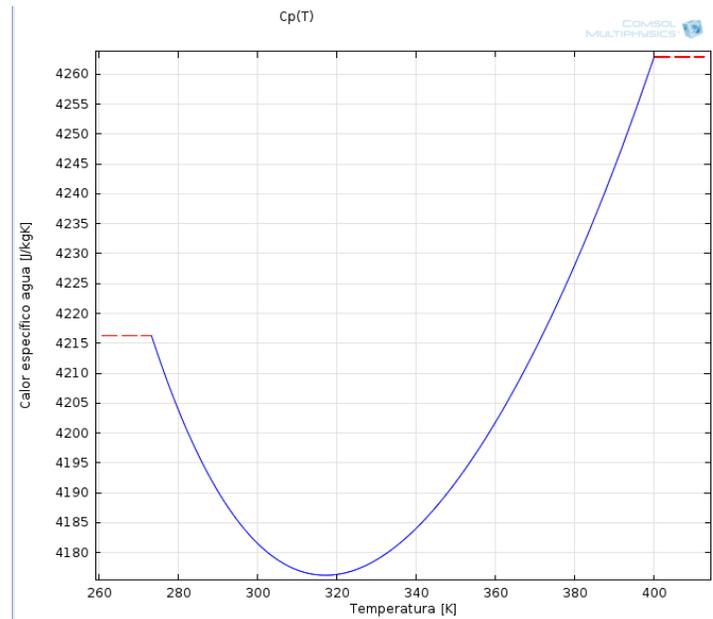
- [1] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). Anuario de Estadísticas del cobre y otros minerales, 1993-2012. Santiago de Chile, 2012.
- [2] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). Informe tendencias del mercado del cobre. Balance 2012, perspectiva 2013-2014. Santiago de Chile, 2012.
- [3] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). Biolixiviación, desarrollo actual y sus expectativas. Santiago de Chile, 2009.
- [4] Gacés, Ingrid. Metalurgia del cobre. Universidad de Antofagasta. [En Línea] <<http://www.uantof.cl/cobre/pdfs/capitulo%20dos.pdf>> [Consulta: 20 de Noviembre del 2013]
- [5] Codelco Educa. Lixiviación. [En Línea] <https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_lixivacion_lixivacion.asp> [Consulta: 20 de Noviembre 2013]
- [6] Codelco Educa. Extracción por Solventes [En Línea] <https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_lixivacion_extraccion.asp> [Consulta: 25 de Noviembre del 2013]
- [7] Codelco Educa. Electroobtención [En Línea] <https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_electroobtencion_celdaselectroliticas.asp> [Consulta: 25 de Noviembre del 2013]
- [8] Cáceres, G. Hidrometalurgia. [En Línea] <<http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/caceres/cursohidrometalurgia/Hidrometalurgia.pdf>> [Consulta: 20 de Noviembre del 2013]
- [9] Vargas T. Nuevas tendencias y enfoques tecnológicos en la lixiviación bacteriana de minerales de cobre. Centro de Hidrometalurgia/Electrometalurgia, Universidad de Chile.
- [10] Monardes, J., 2010. Pre-estudio técnico-económico de la aplicación de la energía solar para pilas de Biolixiviación. Santiago de Chile.
- [11] Ortega, M., 2012. Evaluación técnica y económica de tecnologías para calentar refino de una pila de Biolixiviación. Santiago de Chile.
- [12] Casas J., Vargas T., 1998 *Bioleaching model of a copper-sulphide ore bed in heap and dump configurations*.s.l. Metallurgical and Material Transactions. pp. 899-909.

- [13] Valerio, O. E., 2008. Evaluación energética de la biolixiviación de sulfuros de baja ley en Anglo American sur, división los bronces.
- [14] Rawlings D. E., Johnson D.B., 2007. Cap 8: “*Modeling and Optimization of Heap Bioleach Processes*”. *Biomining*. pp 153-175.
- [15] Cariaga E., Concha F., Sepúlveda M. 2005. Modelación Simultanea de las fases líquidas y gaseosa en pilas de lixiviación para la producción de cobre. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Concepción. Chile.
- [16] Escudey M., Moraga N., Zambra C., Antilén M. 2011. *Sewage sludge disposal and applications: Self-heating and spontaneous combustion of compost piles – Trace metals leaching in volcanic soils after sewage sludge disposal*. Waste Water – Evaluation and Management. (21) pp 399 – 430.
- [17] Moraga N., Zambra C., 2011. *On FVM transport phenomena prediction in porous media with chemical/biological reactions or solid.liquid phase change*. Finite Volume Method – Powerful Means of Engineering Design. (12) pp: 257 - 282
- [18] Leahy M., Davidson M., Schwarz M. 2006. *A two-dimensioal model for the heap bioleaching of chalcocite: Effect of inlet height*. Fifth International Conference on CFD in the Process Industries. pp 1 – 6.
- [19] Leahy M., Davidson M., Schwarz M. 2005. *A model for heap bioleaching of chalcocite whit heat balance: Bacterial temperature dependence*. Minerals Engineering, 18, (13-14), 1239 - 1252.
- [20] Zambra C. 2013. Acoplamiento con la convección exterior de la difusión de calor y masa con reacciones químicas y biológicas en las pilas de lixiviación en terreno. Cuadernos de mecánica computacional 11 (1) pp 50 – 59.
- [21]] Leahy M., Davidson M., Schwarz M. 2006. *An air sparging CFD model for heap bioleaching of chalcocite*. Applied Mathematical Modelling 30, pp 1428–1444
- [22] Zambra C., Alvear N., Maldonado A. 2013. Modelación computacional de flujo de riego de solución de riego en pilas de lixiviación de sulfuros de cobre. Cuadernos de mecánica computacional, 11 (1) pp 70 – 79.
- [23] Comsol Multiphysics. 2012. User Guide versión 4.3.
- [24] Reyes, O. 2006. *Modelling of leaching in heap with forced aeration*. Memoria Universidad de Concepción.
- [25] Dixon, D.G. 2003. *Heap leaching modeling: The current state of art*. Hydrometallurgy, Volume 1: Leaching and solutions purification.
- [26] Lenhard, R. J., Parker J.C., Mishra S. 1989. *On the correspondence between Brooks-Corey and van Genuchten models*. Journal of irrigation and drainage engineering, Vol. 115, n° 4, pp.744-751.

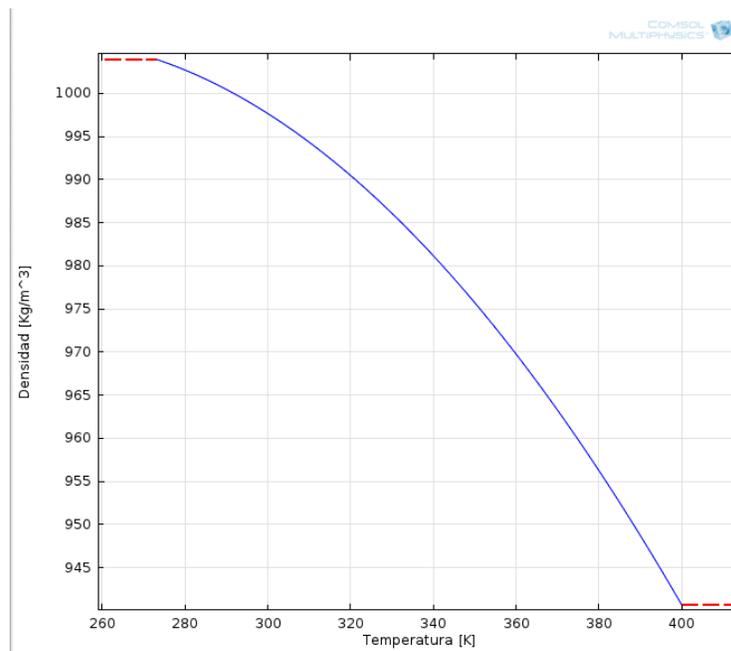
- [27] Duffie, J.A, Beckman, W.A. 1980. *Solar engineering of thermal process*. John Wiley & Sons, New York.
- [28] Dixon, D.G., Petersen, J. *Thermophilic heap leaching of a chalcopyrite concentrate*. Department of metals and material engineering, University of British Columbia.
- [29] Dew, D.W.,Rautenbach, G.F., van Hille, R. P.,Davis-Belmar, C. S., Harvey, I. J., Truelove, J. S. 2011. *High temperature heap leaching of chalcopyrite: Method of evaluation and process model validation*. The southern African institute of mining and metallurgy.
- [30] Evaluación del recurso solar. Departamento de geofísica, Universidad de Chile. 30 de mayo 2014.
- [31] Dixon, D.G. 2000. *Analysis of heat conservation during copper sulphide heap leaching*. Hydrometallurgy 58.
- [32] Angelone, S. Garibay, M. T., Casaux, M. C. 2006. Permeabilidad de suelos. Universidad nacional de rosario.
- [33] Patiño, F. H. Repensar a Darcy. Escuela de ingeniería civil, Facultad de minas, Universidad nacional de Colombia.
- [34] Robledo Ángel, W. 1989. Ley de filtro de Darcy: estudio de coeficientes de permeabilidad isótropa bajo gradientes hidráulicos pequeños. Medellín.
- [35] Harvey, T. J., Holder, N. 2002. *Thermophilic bioleaching of chalcopyrite concentrates with GEOCOAT process*. Copper 7 conference, Perth, Australia.
- [36] Bortolozzi, R. A., Deiber, J. A. 2000. Efectos de los parámetros termofísicos sobre el intercambio de calor entre fases en medios porosos. Congreso, 85 reunión nacional de física.

A) Anexo A:

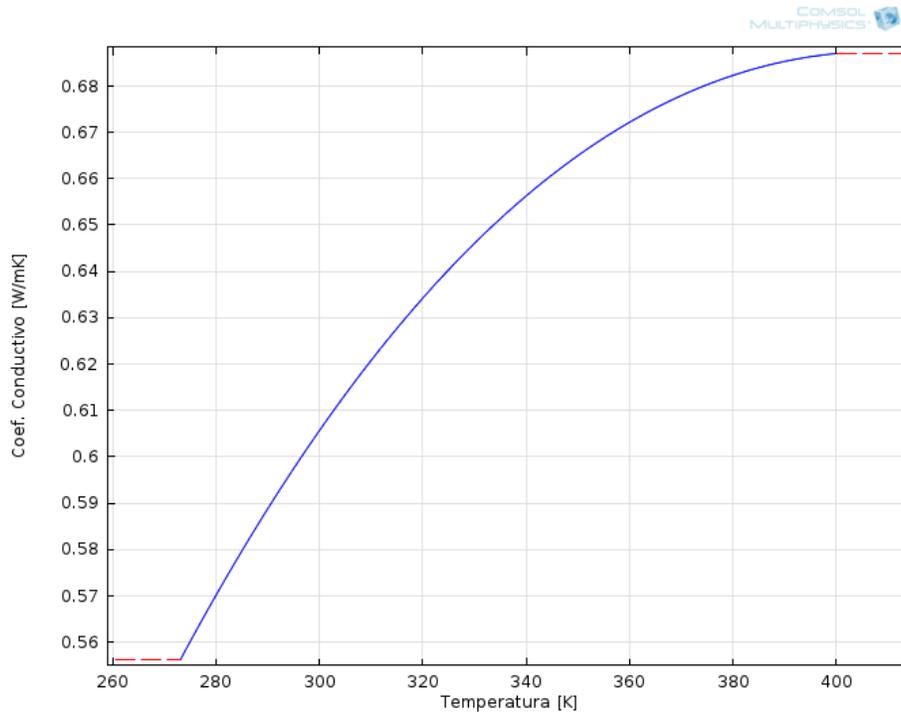
Las siguientes figuras muestran las propiedades del fluido de irrigación.



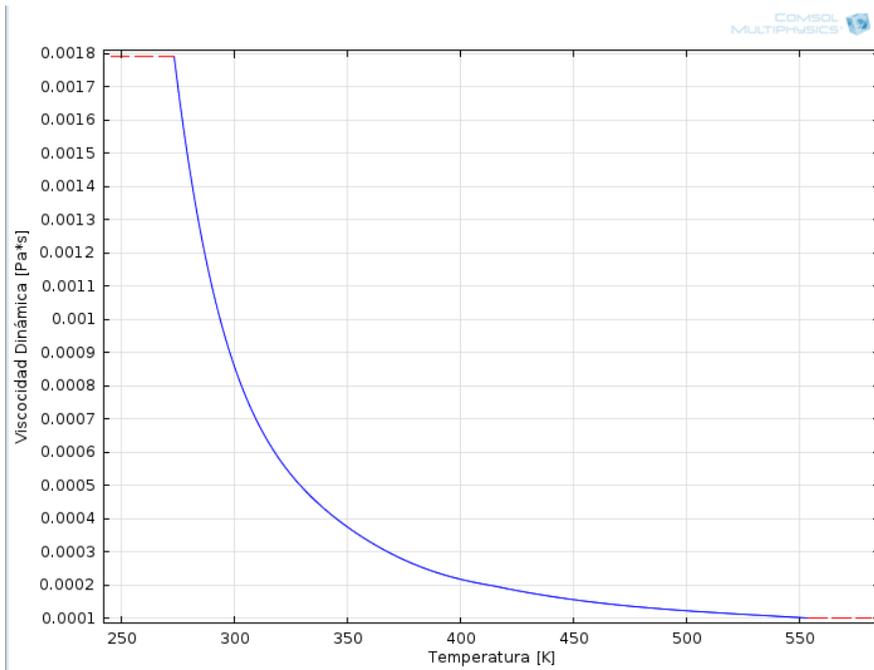
A-1: Calor específico [J/kgK]



A-2: Densidad [kg/m³]



A-3: Coeficiente conductivo [W/mK]



A-4: Viscosidad dinámica [Pa*s]