

5. Análisis comparativo entre conducción en régimen transitorio y como sistema de capacidad.

En esta sección se ha procedido a la realización de un análisis comparativo entre la transferencia de calor en el terreno supuesto como un sistema de capacidad, y bajo la consideración de gradiente térmico en su interior. Se ha conseguido a través del algoritmo implementado en código Matlab, y con la herramienta de integración de ecuaciones en derivadas parciales “*pdetool*”, de Matlab [10].

El objetivo de este Capítulo es la determinación de la bondad del algoritmo desarrollado, respecto del caso de la existencia de gradiente térmico en el interior del terreno. Para ello, ha sido necesario fijar una geometría de terreno con sus correspondientes propiedades termofísicas, de manera que se podrá observar su evolución al cabo de un determinado periodo de tiempo, en ambas situaciones consideradas.

Los datos de partida son detallados a continuación.

- Localidad. Sevilla
 - Temperatura media: 18.6 °C [7]
- Propiedades del terreno.
 - Densidad: 2 000 kg/m³
 - Calor específico: 800 J/(kg·°C)
 - Volumen terreno: Sección circular de 3 metro de diámetro y 1 metro de profundidad al plano.
- Disposición del emparrillado de tubos.
 - Paralelo horizontal con retorno directo
 - Numero de tubos: 5
 - Longitud de tubos: 1 m.
 - Diámetro de tubos: 10 cm.
- Gasto másico de agua.
 - Caudal másico: 7.85 kg/s
 - Velocidad: 0.2 m/s
- Tiempo de simulación.
 - 24 horas de funcionamiento continuo.
- Temperatura del fluido caloportador a la entrada.
 - Se supondrá una temperatura constante en todo el tubo enterrado de 40 °C

La geometría ensayada es mostrada, en diferentes vistas, en la Figura 69 y Figura 70.

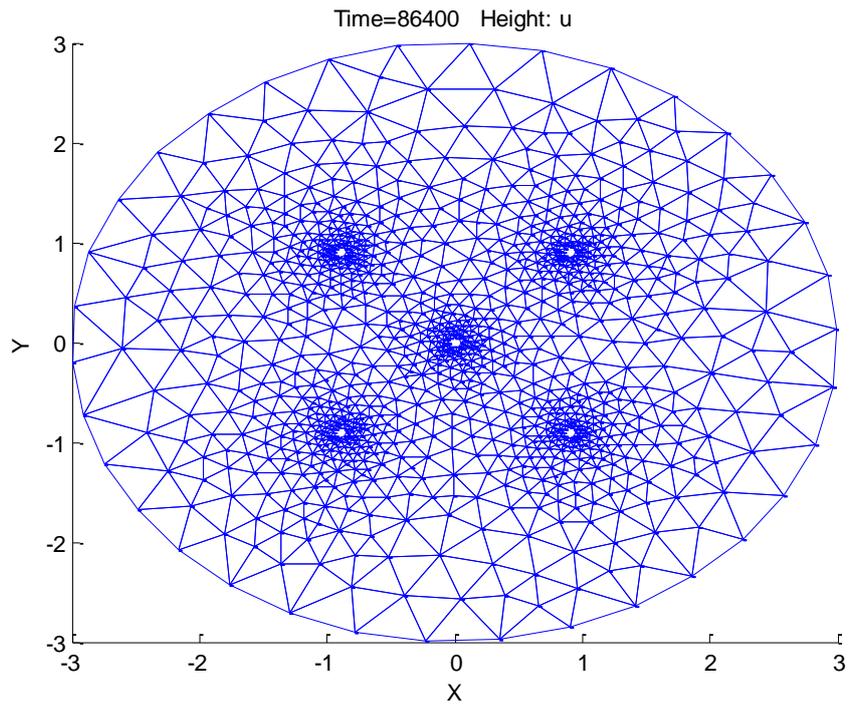


Figura 69.- Vista en planta. Geometría simulada.

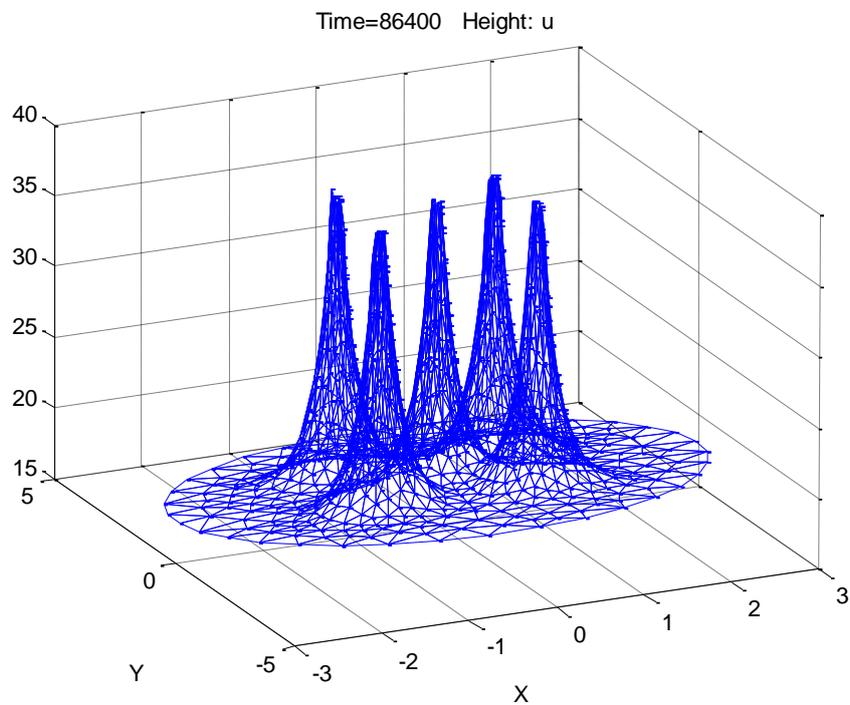


Figura 70.- Vista en 3D de la geometría considerada.

5.1 Modelo bajo hipótesis de sistema de capacidad.

La evolución térmica del terreno, supuesto de capacidad, queda determinado en la Figura 71.

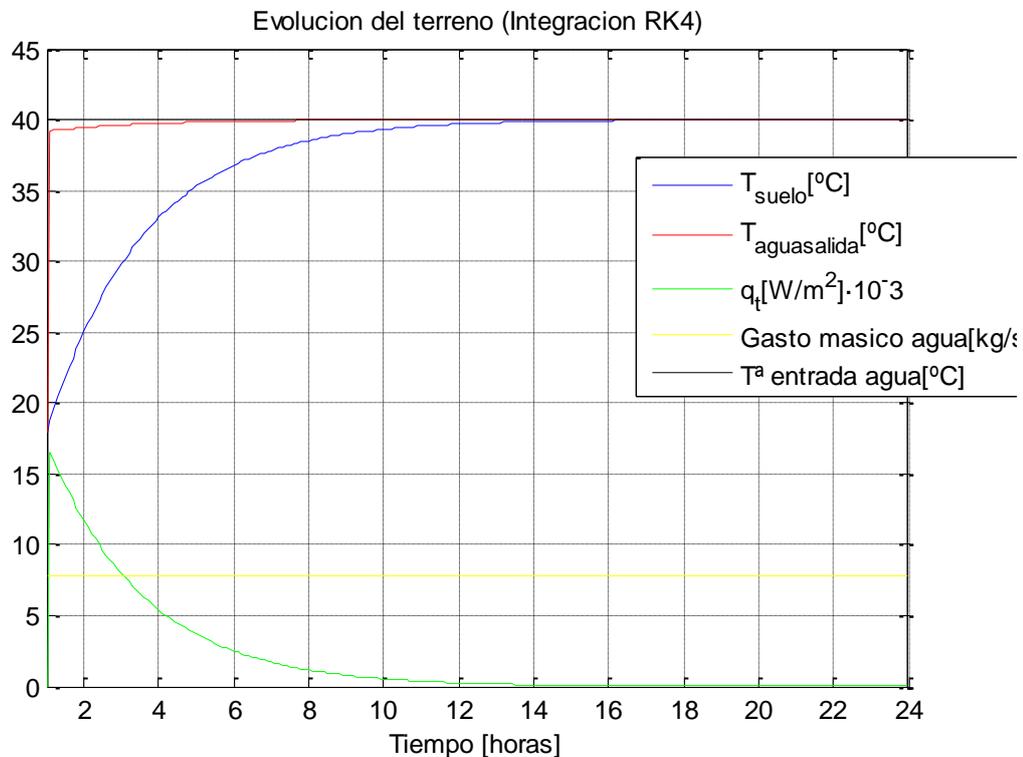


Figura 71.- Evolución térmica del terreno supuesto sistema de capacidad.

Como aspecto destacado, se puede citar que la temperatura de salida del agua es cercana a los 40 °C desde el instante inicial, debido a la escasa longitud y diámetro de las tuberías (1 metro y 10 cm de longitud y diámetro, respectivamente), con lo que no se proporciona el tiempo necesario para que se desarrolle una mayor transferencia calórica. En efecto, si se aumenta la longitud de los conductos, disminuye la temperatura de salida del agua en los instantes iniciales, como ha sido expuesto en la sección 4.1.1 *Análisis de sensibilidad*.

5.2 Modelo supuesto gradiente térmico en interior del terreno.

Si se simula el modelo con las propiedades anteriormente descritas, para el instante inicial, se obtienen la Figura 72 y Figura 73.

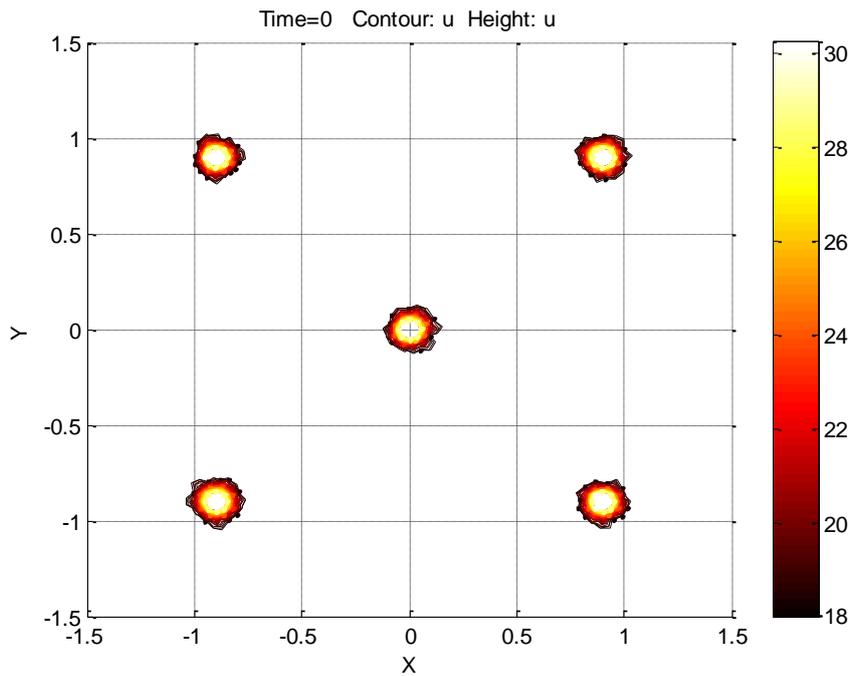


Figura 72.- Curvas de isoterma alzado (instante inicial).

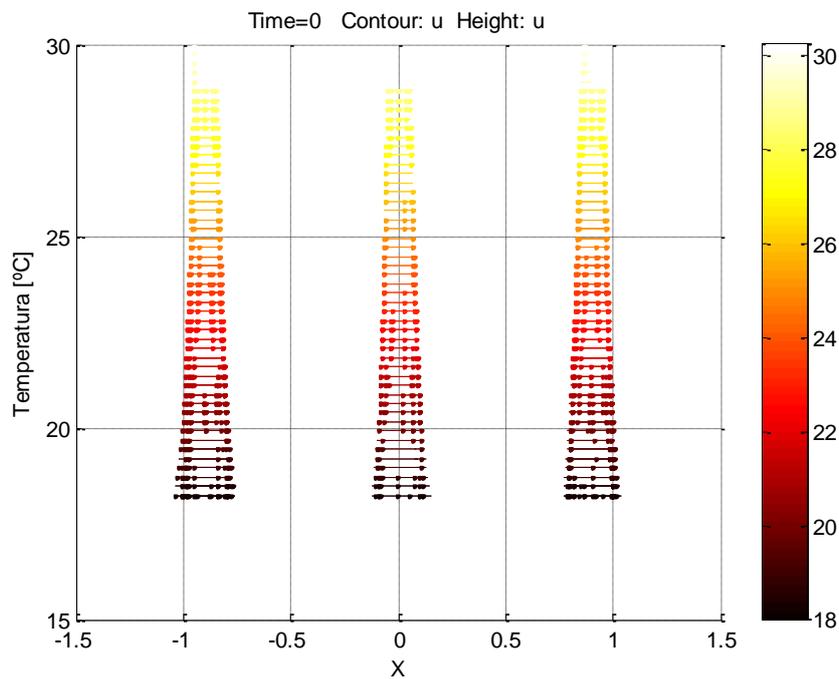


Figura 73.- Evolución térmica del terreno en altura (instante inicial).

En cambio, a las 12 horas de funcionamiento se obtiene la siguiente distribución térmica en la geometría considerada.

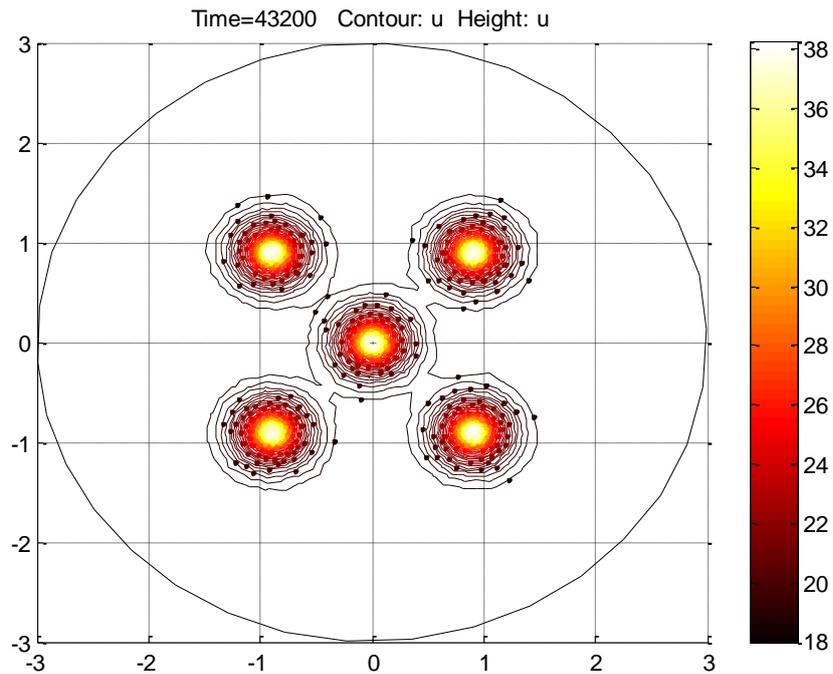


Figura 74.- Curvas de isoterma alzado (12 horas).

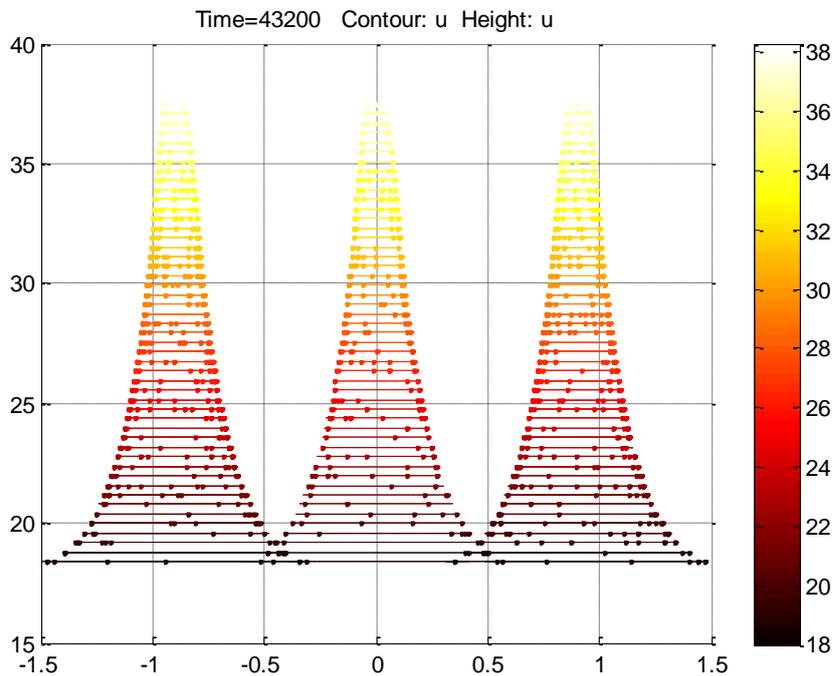


Figura 75.- Evolución térmica del terreno en altura (12 horas).

La distribución de temperaturas final del sólido es la mostrada en las dos siguientes representaciones gráficas.

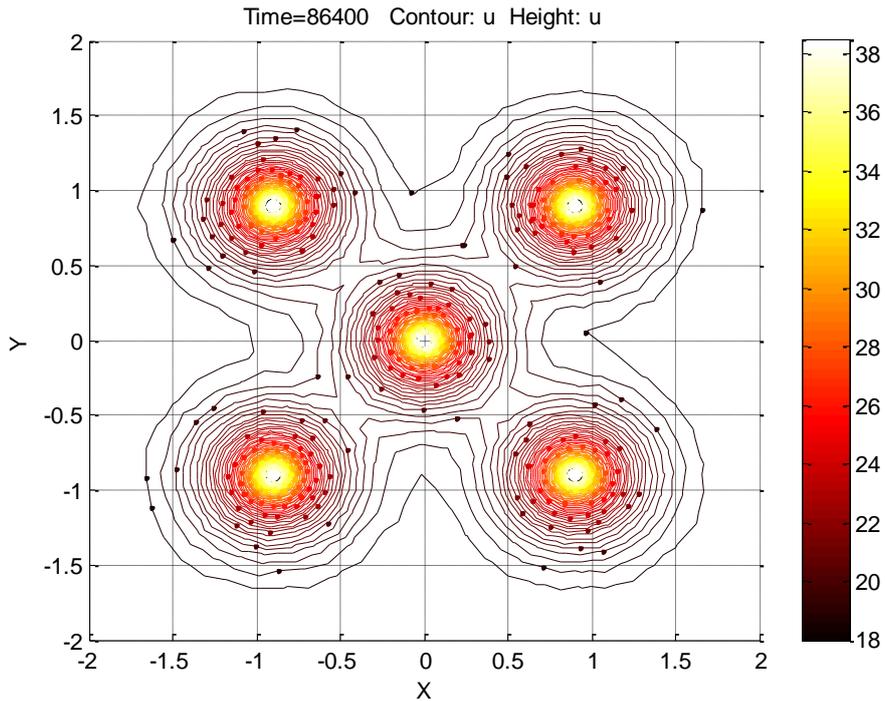


Figura 76.- Curvas de isoterma alzado (24 horas).

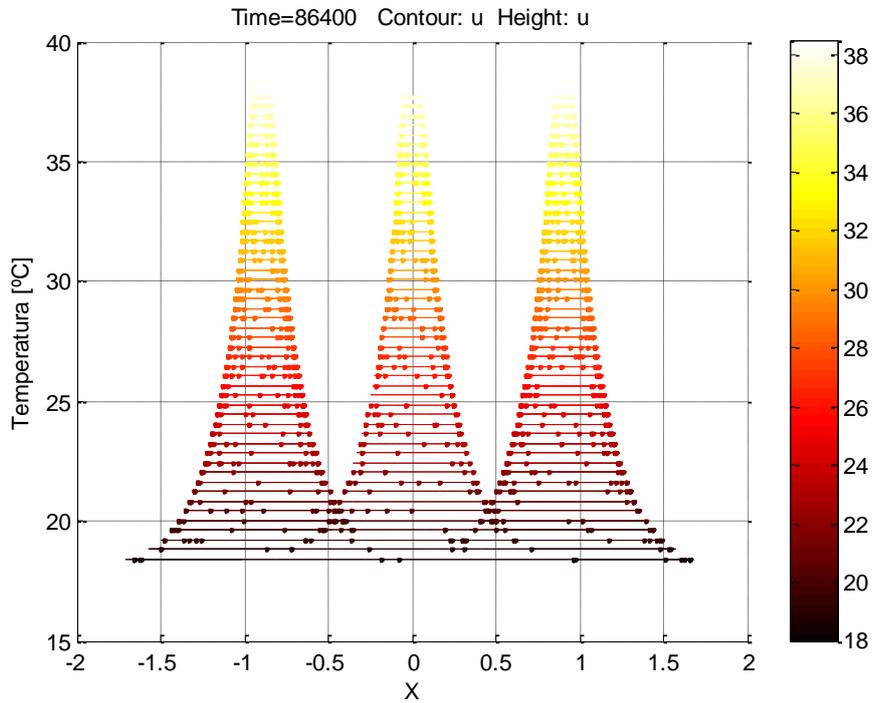


Figura 77.- Evolución térmica del terreno en altura (24 horas).

Si en el instante final es representada la densidad de flujo de calor se obtiene la Figura 78.

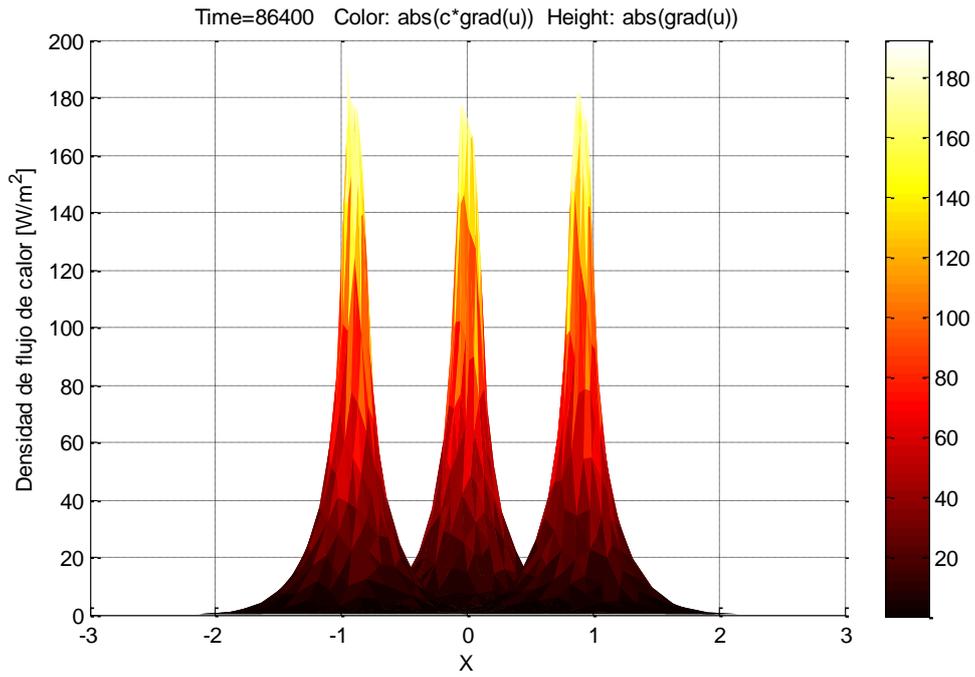


Figura 78.- Densidad de flujo de calor [W/m²] a las 24 horas.

Para un instante de tiempo correspondiente a las 12 horas de funcionamiento se obtiene la Figura 79.

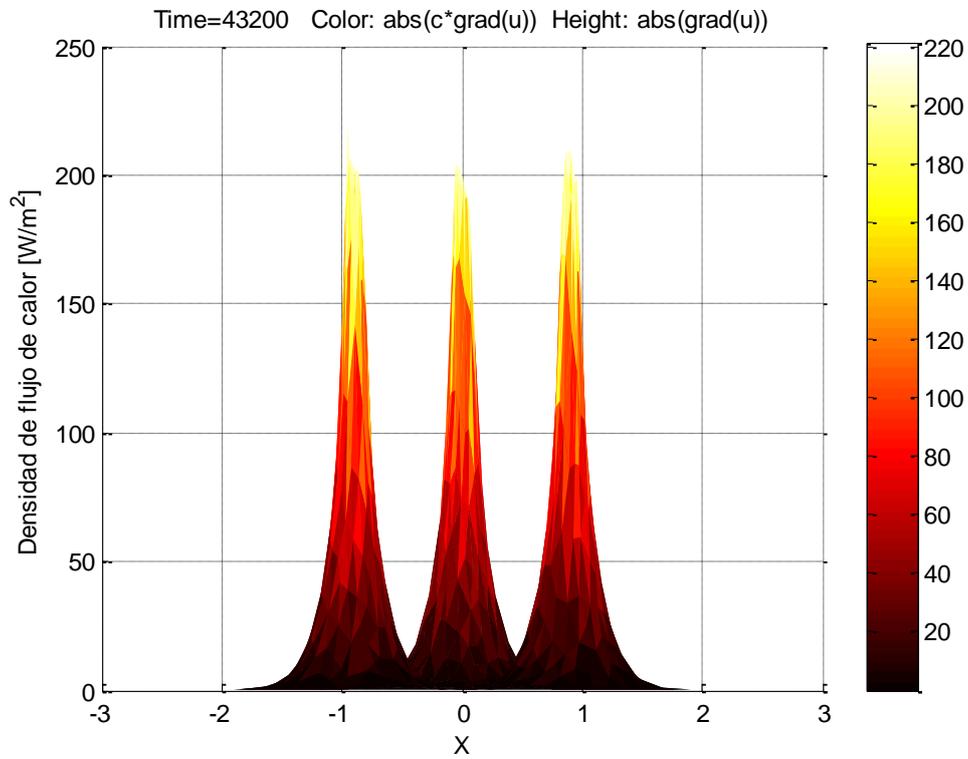


Figura 79.- Densidad de flujo de calor [W/m²] a las 12 horas.

Es destacable la elevada disminución de la transferencia calórica a las 24 horas, respecto del instante inicial, mostrado en la Figura 80.

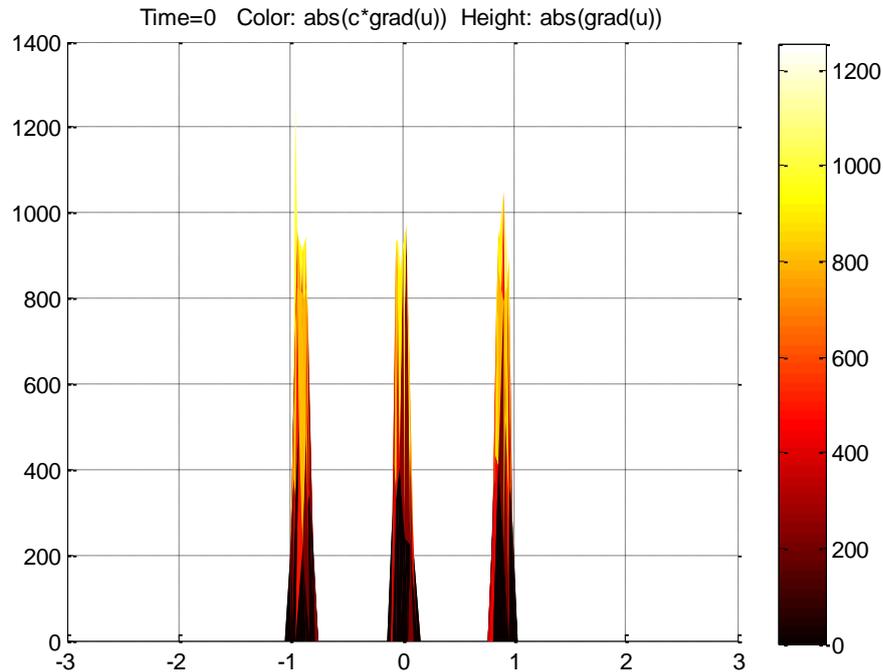


Figura 80.- Densidad de flujo de calor [W/m^2] en el instante inicial.

5.3 Comparativa entre los casos anteriores.

Como se extrae de las simulaciones anteriores, realizar la aproximación de un sistema real, con conducción en régimen transitorio en su interior, por un terreno bajo la hipótesis de sistema de capacidad no es completamente adecuado, ya que los resultados obtenidos difieren en un alto grado.

La temperatura alcanzada por el terreno a las 24 horas de funcionamiento, bajo la hipótesis de sistema de capacidad, es $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, mientras que al considerar conducción en régimen transitorio, el terreno solamente modifica su temperatura inicial en un área de 1.5 metros de radio, es decir, aproximadamente el 50 % del área total considerada. Observando la Figura 77.- Evolución térmica del terreno en altura (24 horas)., se puede concluir que la fracción de terreno que alcanza temperaturas próximas a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ es un sector circular, alrededor de los conductos, de 25 centímetros de diámetro, lo cual no concuerda con los resultados obtenidos bajo la hipótesis de sistema de capacidad. De ahí la imprecisión cometida al realizar la aproximación comentada en el primer párrafo.

Lo anteriormente citado es explicable por el hecho de que, en la realidad el terreno no cuenta con una conductividad elevada, en contra de lo supuesto con la hipótesis de sistema de capacidad. Además, se puede resaltar que los materiales, de los cuales están compuestos los suelos, son los que menor conductividad tienen de la mayoría de compuestos existentes. Por otro lado, si se considera la porosidad del terreno como un factor que confiere resistencia térmica a la difusión del calor a través del mismo, el modelo matemático como sistema de capacidad todavía se alejaría en mayor medida, respecto del caso con gradiente térmico. Para caracterizar numéricamente lo anteriormente descrito se puede mencionar que la conductividad térmica del cobre es de $600 \frac{W}{m^{\circ}C}$, mientras que este mismo parámetro, en tierra, se ubica entre $0.1 \frac{W}{m^{\circ}C}$ y $6 \frac{W}{m^{\circ}C}$, por no citar que la conductividad del aire, existente en los poros, oscila entre $0.02 \frac{W}{m^{\circ}C}$ y $0.04 \frac{W}{m^{\circ}C}$, dependiendo de la temperatura.

Si se comparan las densidades de flujo de calor para ambos casos (Tabla 5), se observan las tendencias comentadas a continuación.

Tiempo [horas]	Densidad de flujo de calor [W/m²] (Gradiente Térmico)	Densidad de flujo de calor [W/m²] (SC)
0	1 200	15 000
12	200	247
24	180	2.89

Tabla 5.- Comparativa densidad flujo de calor.

Los valores de la Tabla 5 proporcionan una interpretación física de lo sucedido. De ella, se puede deducir que en el caso de la consideración del gradiente térmico en el subsuelo, el calor se propaga más lentamente que al ser considerado como sistema de capacidad, debido a la elevada resistencia térmica ejercida por el mismo. Bajo la suposición de conducción transitoria se requiere más tiempo para la saturación del terreno, donde en los instantes iniciales, la transferencia de calor es del orden del millar debido a la alta resistencia térmica y salto de temperaturas existente, disminuyendo sin anularse en horas posteriores ya que el terreno todavía no se encuentra saturado térmicamente. En el estudio bidimensional, la densidad de flujo de calor no se anula para el tiempo considerado, ya que el terreno se encuentra lejos de su colmatación debido a la gran resistencia térmica con que cuenta la corteza terrestre.

Si se comparan ambos casos, bajo la hipótesis de sistema de capacidad, la transferencia de calor en los instantes iniciales es muy superior al intercambio calórico producido en la otra situación. Lo cual es debido a la no consideración de la elevada resistencia térmica ejercida por el terreno y al elevado salto térmico existente ($\Delta T \cong 20 \text{ }^{\circ}C$). Otro aspecto de gran importancia es la rápida tendencia a cero del calor transferido, motivado

por la rápida respuesta térmica del terreno al contar con una conductividad muy elevada, es decir, el terreno adquiere temperatura muy rápidamente debido a que todos sus zonas alcanzan estados térmicos similares en el mismo instante.

Por otra parte, el flujo de calor es mucho mayor en el instante inicial que en el instante final para ambos casos, debido a que la diferencia de temperatura entre los conductos enterrados y el terreno decrece conforme aumenta el tiempo de simulación. Como se esperaba, no se trata de un decremento lineal con el tiempo, sino que es obtenida una variación exponencial, como muestran los valores representados en la Tabla 5. La explicación física de este hecho radica en el acercamiento de temperatura sufrido entre la corriente de fluido de trabajo y el terreno, siendo cada vez menor en el transcurso del tiempo.

Como aspecto de interés, se puede determinar el tiempo necesario para la saturación térmica del terreno supuesto con gradiente térmico en su interior.

Para 80 horas de cesión térmica, el resultado es mostrado a continuación.

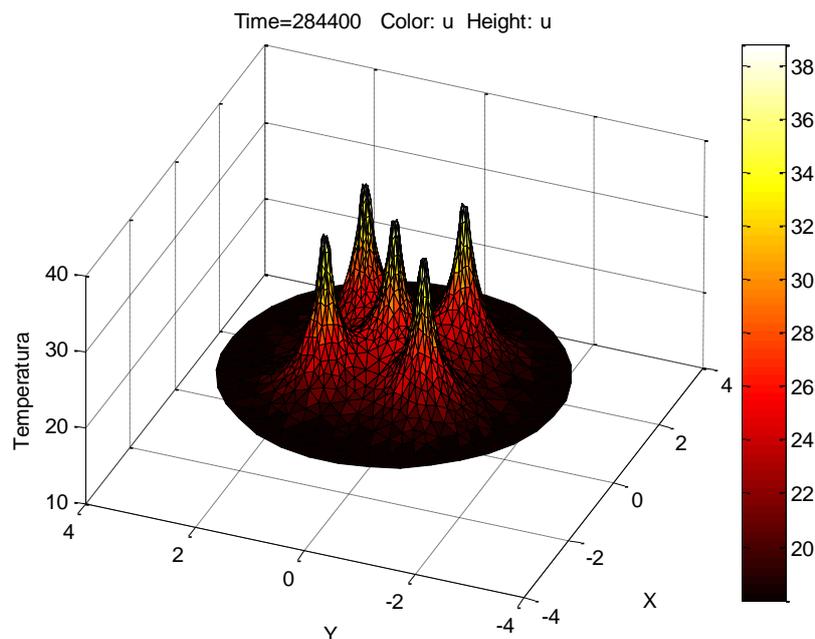


Figura 81.- 80 horas de cesión térmica ininterrumpida.

A las 250 horas, la evolución térmica del terreno es la mostrada en la Figura 82.

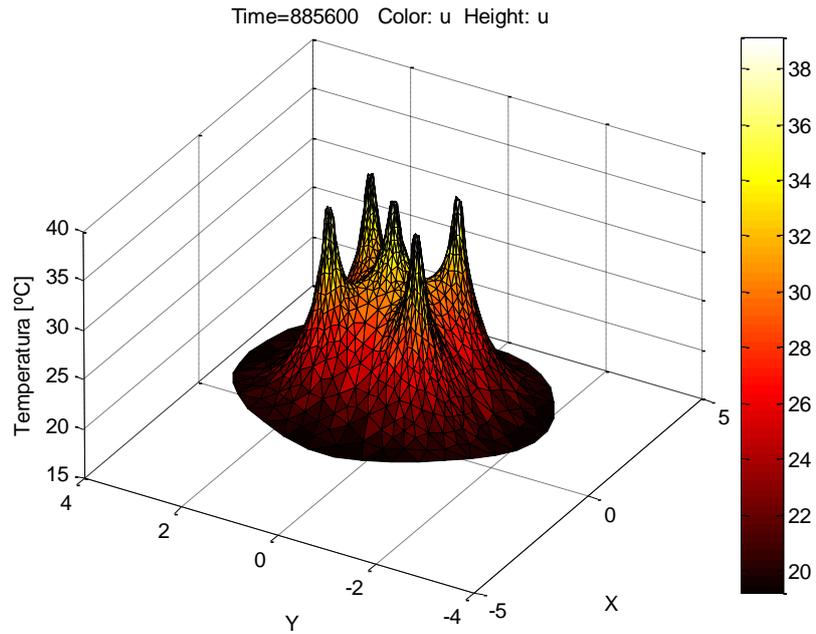


Figura 82.- 250 horas de cesión térmica ininterrumpida.

Se puede visualizar en la Figura 83 cómo a las 500 horas de transferencia térmica ininterrumpida, con tubos por los que circula un fluido a 40 °C, la interacción térmica entre tubos es total, lo que ralentiza la saturación térmica del terreno hasta tiempos muy superiores.

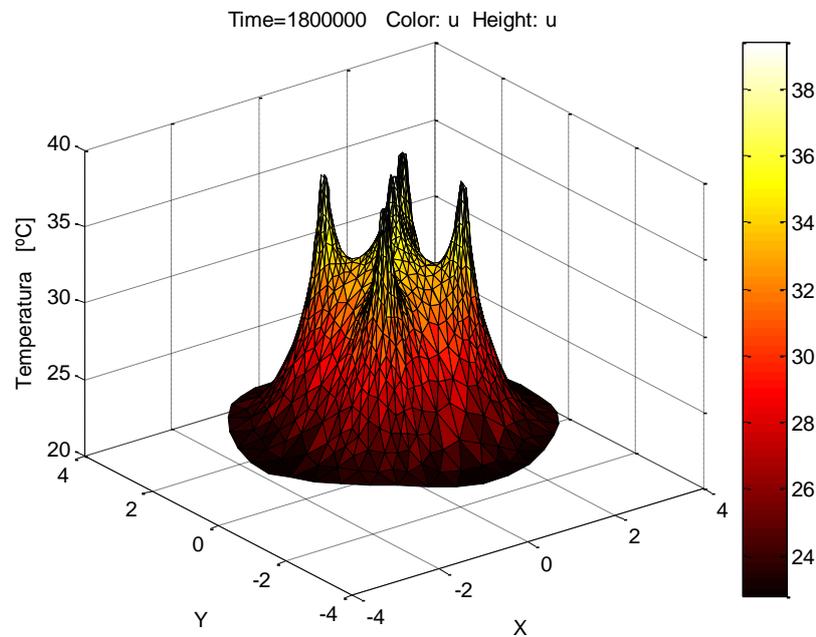


Figura 83.- 500 horas de cesión térmica ininterrumpida.

Las razones expuestas en los párrafos anteriores determinan una justificación suficiente de la gran diferencia existente entre los tiempos necesarios para la saturación térmica del terreno en ambas situaciones.

A efectos de caracterización de esta última situación comentada, para una mejor comparativa con el sistema supuesto de capacidad, es posible la determinación de la temperatura de salida del agua, para cada instante de tiempo, despejando de las siguientes ecuaciones.

$$Q_t = q_t \cdot A_t \quad (14)$$

Donde: Q_t es el calor transferido del fluido al terreno [W]

q_t es la densidad de flujo de calor [W/m^2]

A_t es el área de transferencia (3π) [m^2].

Se ha considerado la densidad de flujo de calor correspondiente a la superficie de un conducto (ya que la densidad de flujo es dependiente del área de transferencia de la energía calórica) para proporcionar un flujo de calor constante.

A su vez:

$$Q_t = m_w \cdot C_{pw} \cdot (T_{we} - T_{ws}) \quad (15)$$

Donde: m_w es el gasto másico de agua (1.57 kg/s por cada tubería enterrada) [kg/s]

C_{pw} es el calor específico del agua (4.19 kJ/(kg·K))

T_{we} es la temperatura de entrada del agua (40 °C)

En la Tabla 6 son mostradas las temperaturas de salida del fluido caloportador del sistema de tubos enterrados, en las dos situaciones anteriormente detalladas.

Tiempo [horas]	T_{ws}^{VT} [°C]	T_{ws}^{SC} [°C]
0	38.28	39.23
12	39.71	39.99
24	39.74	39.99

Tabla 6.- Temperatura salida agua. Comparativa.

Tras el análisis de las temperaturas de salida del fluido de trabajo, en ambos casos, se han extraído las siguientes conclusiones.

Las temperaturas de salida del fluido caloportador siguen la misma tendencia que la densidad de flujo de calor. Es decir, en la situación de sistema de capacidad, a las 12 horas de funcionamiento, la temperatura de salida se sitúa en 39.99 °C (Figura 84), mientras que bajo la segunda hipótesis la temperatura se ubica en 39.71 °C, evolucionando muy lentamente a partir de este instante.

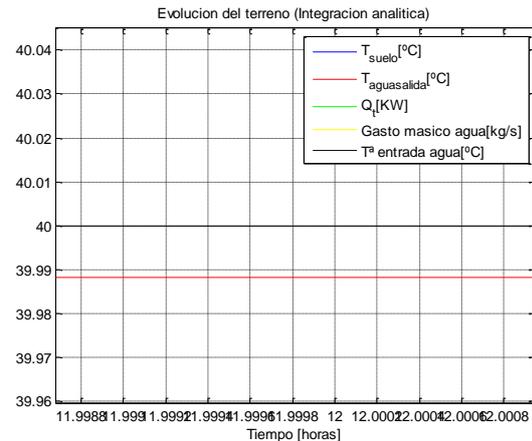


Figura 84.- Temperatura agua salida a las 12 horas (SC).

La temperatura de salida del agua, en el caso de gradiente térmico, ha alcanzado 40 °C al cabo de las 500 horas mostradas anteriormente, debido a la gran resistencia térmica impuesta por el terreno. En el caso de sistema de capacidad, esta temperatura se sitúa muy próxima a 40 °C desde el inicio, ya que, además del reducido tiempo de residencia de las partículas en el interior del sistema, la resistencia térmica del terreno ha sido despreciada.

Como cabía esperar de acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente, el terreno con gradiente térmico sufre un ligero incremento de la temperatura de salida, conforme transcurren las horas, pero no llega a alcanzar los 40 °C. Esto es debido a que la transferencia de calor se mantiene en su interior, al no encontrarse tan saturado térmicamente como el terreno bajo la hipótesis de sistema de capacidad en el mismo instante.