

7. ESTUDIO DEL EFECTO BARRERA

En este capítulo se muestra el análisis del posible efecto barrera inducido por las pantallas sobre las aguas subterráneas durante el periodo de explotación del túnel.

Las pantallas seccionan completamente el acuífero Superficial y la cota de la solera del túnel queda, en la mayor parte de su trazado, por debajo de este acuífero. El flujo de agua subterránea en el acuífero, al no ser paralelo a la traza del túnel, se verá modificado, de forma que, cabe esperar un aumento de los niveles aguas arriba dónde el flujo se ve impedido y una disminución de los mismos aguas abajo. Este posible efecto barrera se ha modelado mediante elementos finitos. Básicamente, se han comparado tres situaciones, las piezometrías resultantes sin el túnel y con el túnel con y sin medidas correctoras.

Los resultados del modelo han permitido cuantificar los efectos de esta construcción, precisando las fluctuaciones de nivel en el caso de no adoptar medidas correctoras y los caudales que deberían permitirse circular para controlar el ascenso o descenso de los niveles freáticos. Se han calculado las características de los pozos horizontales propuestos.

7.1. Modelación Numérica en sección vertical

El análisis del efecto barrera que inducen las pantallas una vez ejecutadas las obras se ha simulado en sección vertical con el modelo del *Apartado 6.2*, bajo las siguientes hipótesis:

- Geología que considera las capas de limos-arcillas más impermeables en el fondo de la excavación y en la base de las pantallas (G1).
- Fondo de la excavación ya ejecutado (caudal de salida nulo).
- Sin pozos sangradores.
- Considerando el Acuífero Principal no fluyente.
- No se permite la circulación del caudal medio estimado que pasa por el futuro trazado del túnel ($140 \text{ m}^2/\text{día}/100\text{m}$).

En la *Figura 7.1* se puede observar como aguas arriba de la pantalla los niveles aumentan, alcanzando valores de hasta 16.6 m, lo que significa un aumento de niveles de 14 a 16 m respecto al nivel piezométrico actual y el consecuente incremento de presiones en las pantallas. Obviamente, este ascenso es absurdo y se vería acotado por multitud de procesos no incluidos en este modelo, tales como drenaje superficial, el ascenso de niveles dará lugar a un flujo lateral.

Estudios anteriores realizados por la UPC [48] permiten estimar, en el caso más desfavorable, una diferencia de nivel que puede llegar a los 2m. En los apartados siguientes se expone un análisis más adecuado para estimar el efecto barrera y los resultados obtenidos.

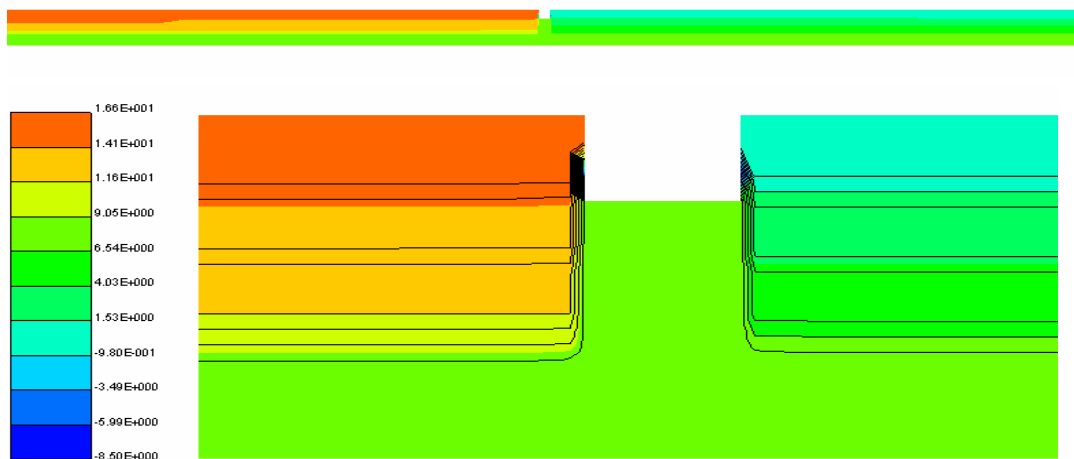


Figura 7.1 Mapa de niveles resultante del modelo del Apartado 6.2, bajo las hipótesis expuestas en este apartado para considerar el efecto barrera de las pantallas. Zoom con los niveles alrededor de las pantallas.

7.2. Modelación Numérica en planta a Escala Regional

La simulación del efecto barrera a escala regional se ha realizado a partir del modelo del Delta del Llobregat del Grupo de Hidrogeología de la UPC (Modelo matemático de flujo y transporte y programa de gestión de los acuíferos: Cubeta de Sant , Vall Baixa y Delta de Llobregat, UPC y ACA [49]). Los datos de piezometría con los que se ha calibrado el modelo corresponden a los años comprendidos entre 1965 y 2001. La calibración del modelo se considera muy satisfactoria.

El estudio se ha realizado en régimen transitorio. Se ha utilizado un tiempo total de 36 años, discretizado en intervalos mensuales. De esta forma, se ha comparado la evolución real de los niveles en este acuífero desde el año 1965 hasta diciembre del 2001, respecto a los efectos que habría tenido la construcción de un túnel sobre los niveles en este periodo. Se han analizado tres situaciones piezométricas finales correspondientes a Diciembre de 2001, sin túnel, con túnel sin medidas correctoras y túnel con medidas correctoras.

La metodología que se ha seguido consta de los siguientes pasos:

- a) Introducción de la geometría de la traza del túnel en el modelo del Delta del Llobregat (*Figura 7.2*)
- b) Recálculo de la malla para adaptarla a la geometría de la traza. Es importante que la geometría de la traza quede bien reproducida por la malla de elementos finitos (*Figura 7.3*).
- c) Ejecución del programa y obtención de resultados con la nueva malla simulando que no hay túnel.
- d) Ejecución del programa y obtención de resultados con la nueva malla simulando la existencia de la traza del túnel, en el mismo dominio temporal que en el punto anterior.
- e) Comparación de la distribución espacial de los niveles en el tiempo final y de su evolución temporal en dos puntos de observación a 5m aproximadamente del trasdós de cada pantalla en la zona dónde se han obtenido mayores variaciones de niveles.
- f) Estimación de una transmisividad equivalente de la traza que permita el flujo natural a través de las medidas correctoras en las pantallas.

- g) Ejecución del programa con las transmisividades equivalentes.
- h) Comparación de los niveles en los puntos de observación en el intervalo de tiempo (36 años). Comparación de las piezometrías en el tiempo final.
- i) Cálculo del radio y la longitud de los pozos horizontales.

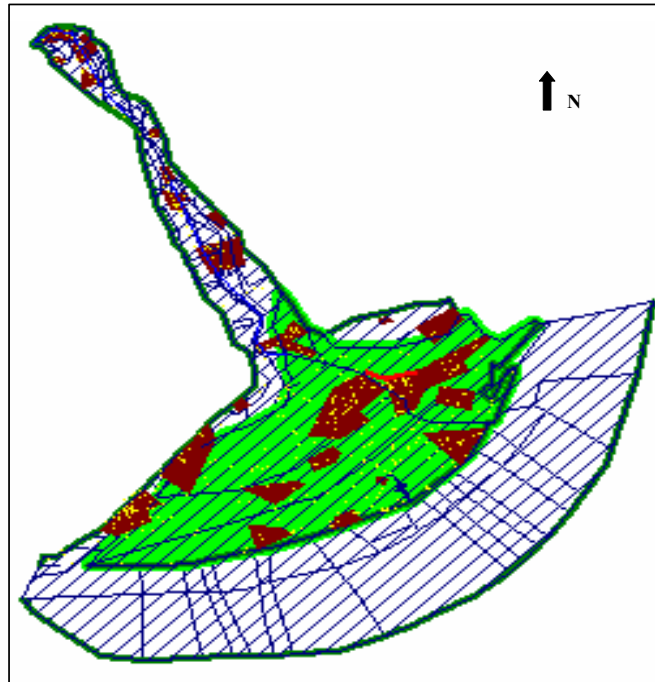


Figura 7.2 Ubicación de la traza del túnel en el modelo del Delta del Llobregat. En verde se muestra la capa correspondiente al Acuífero Superficial, en rojo la traza del túnel, los puntos amarillos corresponden a puntos de control a partir de los cuáles se ha calibrado el modelo.

El efecto del túnel se ha simulado asignando, en la capa correspondiente al acuífero superficial, una transmisividad reducida. Los parámetros hidráulicos utilizados corresponden a pantallas con juntas bien ejecutadas [52]. Se exponen en la *Tabla 7.1*.

Tabla 7.1 Parámetros hidráulicos asignados al túnel en el modelo.

Transmisividad (m ² /d)	Coefficiente de Almacenamiento
1E-3	1E-4

Las medidas correctoras propuestas consisten en sondeos (lanzas) que conectan los dos lados del túnel. Para simularlos se ha asignado a la traza una transmisividad equivalente. Los parámetros utilizados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7.2 Parámetros hidráulicos asignados al túnel simulando mediante transmisividad equivalente la situación con medidas correctoras.

Transmisividad (m ² /d)	Coefficiente de Almacenamiento
25	10E-4
5	10E-4

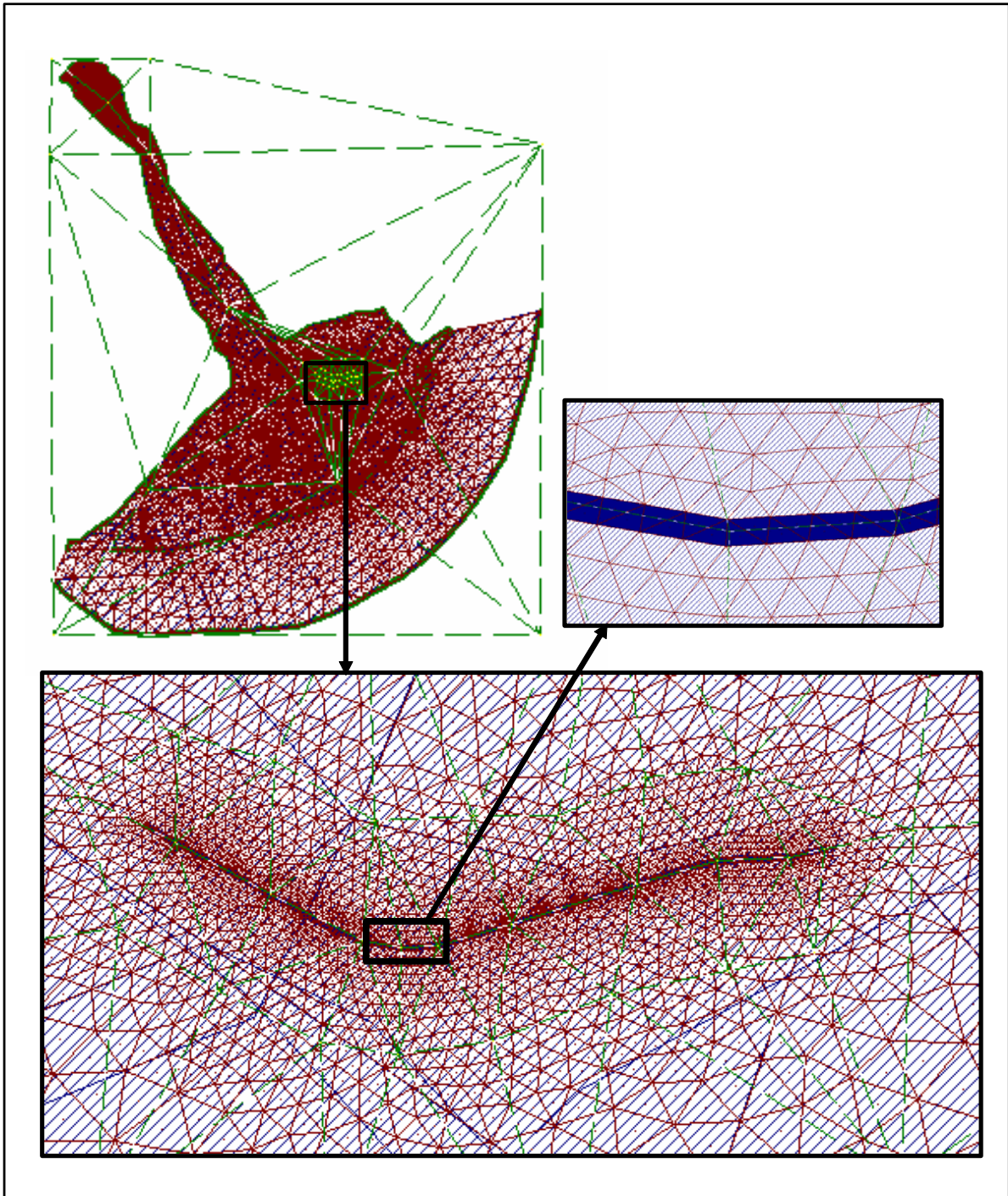


Figura 7.3 Detalles de la malla de elementos finitos empleada en el análisis.

7.3. Resultados

La evolución temporal en las distintas situaciones de los niveles en los dos puntos de observación situados en el trasdós de las pantallas está resumido en la *Figura 7.4*. En la situación sin pantallas, el punto situado en el lado Norte queda aguas abajo, el punto en el lado Sur queda aguas arriba. La diferencia de niveles entre la situación sin pantallas y con pantallas sin medidas correctoras es mayor aguas abajo que aguas arriba. Las máximas variaciones, de hasta 3.5 m, se dan en la década de los 70, corresponderían a periodos de intensos bombeos en la zona de Cornellà, donde acuífero Superficial y

Principal confluyen. Estos bombeos dieron lugar a piezometrías que agravarían el efecto barrera puesto que provocaron un aumento de la velocidad del flujo en dirección perpendicular al trazado. El descenso correspondiente a la situación que se ha tomado como referencia (Diciembre 2001) es de 1.1 m. Los descensos son mínimos en las condiciones que se dieron en 1997, cuando casi recuperaron los niveles naturales. En estas condiciones, el flujo es tan pequeño que apenas se produce desnivel (descenso de 0.3m).

Las pautas de ascensos son análogas a las de descensos, pero menos marcados. El ascenso máximo (del lado de aguas arriba) es de 2 m en los años 70 y no llega a 1 m en las condiciones de Dic., 2001. El ascenso mínimo se produce también cuando los niveles están más altos (1997) y es de tan sólo 0.2 m.

En la *Figura 7.4* también se muestran las evoluciones de niveles aguas arriba y aguas abajo cuando se construyen drenes laterales (en el próximo apartado se describen sus características constructivas) que conducen a transmisividades equivalentes de 5 y 25 m²/día. En esencia, los desniveles se reducen a la mitad si la transmisividad equivalente es de 5 m²/día y a la sexta parte si es de 25 m²/día, respecto al caso de pantallas sin drenes.

La magnitud de los niveles en el modelo en el mes de diciembre del 2001 (*Figura 7.5*) es muy similar a los niveles locales obtenidos en los piezómetros de la traza en los meses de septiembre a noviembre del 2003. Existen diferencias en cuanto a la dirección del flujo, puesto que la piezometría obtenida a lo largo de la traza con los datos de campo es muy local y el modelo apenas ha empezado a notar los bombeos actuales en la Gran Vía y en la desembocadura del río. Estos bombeos, que se han realizado para excavar las cimentaciones de diversas construcciones bajo el nivel freático. Sin embargo, el sentido del flujo, tanto a escala regional como a escala local no es paralelo a la traza del túnel, en ambos casos tiene componente Sur-Norte y el modelo contempla una situación algo más desfavorable debido a que los gradientes en éste son ligeramente superiores. Ello, unido a que a la larga, cesarán dichos bombeos, nos ha inclinado a adoptar la situación prevista en el modelo.

En la *Figura 7.7* se comparan las piezometrías con y sin el túnel, donde se puede observar que las zonas más próximas al río son menos sensibles a la variación de las curvas de nivel. Los gradientes aumentan en el extremo Sureste de la traza. La afección de la obra a escala regional se muestra en la *Figura 7.8*. Los descensos aguas abajo alcanzan valores superiores a 0.6 m hasta aproximadamente 1 km de la traza (*Figura 7.9*). La extensión de la zona afectada por ascensos es mucho menor, ya que, si suben los niveles, el río dejará de recargar al acuífero, con lo que el efecto queda acotado.

A partir de los resultados obtenidos comparando la situación con y sin el túnel y con los datos de transmisividades obtenidos en los ensayos, el caudal que debería permitirse circular es de aproximadamente para mantener el flujo natural actual es de 90 a 150 m³/día/100ml. Con los gradientes obtenidos en las campañas de campo el caudal que resulta es de aproximadamente 50 a 100 m³/día/100ml.

La situación con drenes capaces de mantener una transmisividad equivalente en el trazado de 25 m²/d (*Figuras 7.11, 5.14 y 5.15*) es muy parecida a la situación de referencia. Respecto a la situación más desfavorable en el tiempo, los descensos pasarían de 3.5 m a 0.5 m si se adoptan medidas correctoras (*Figura 7.4*).

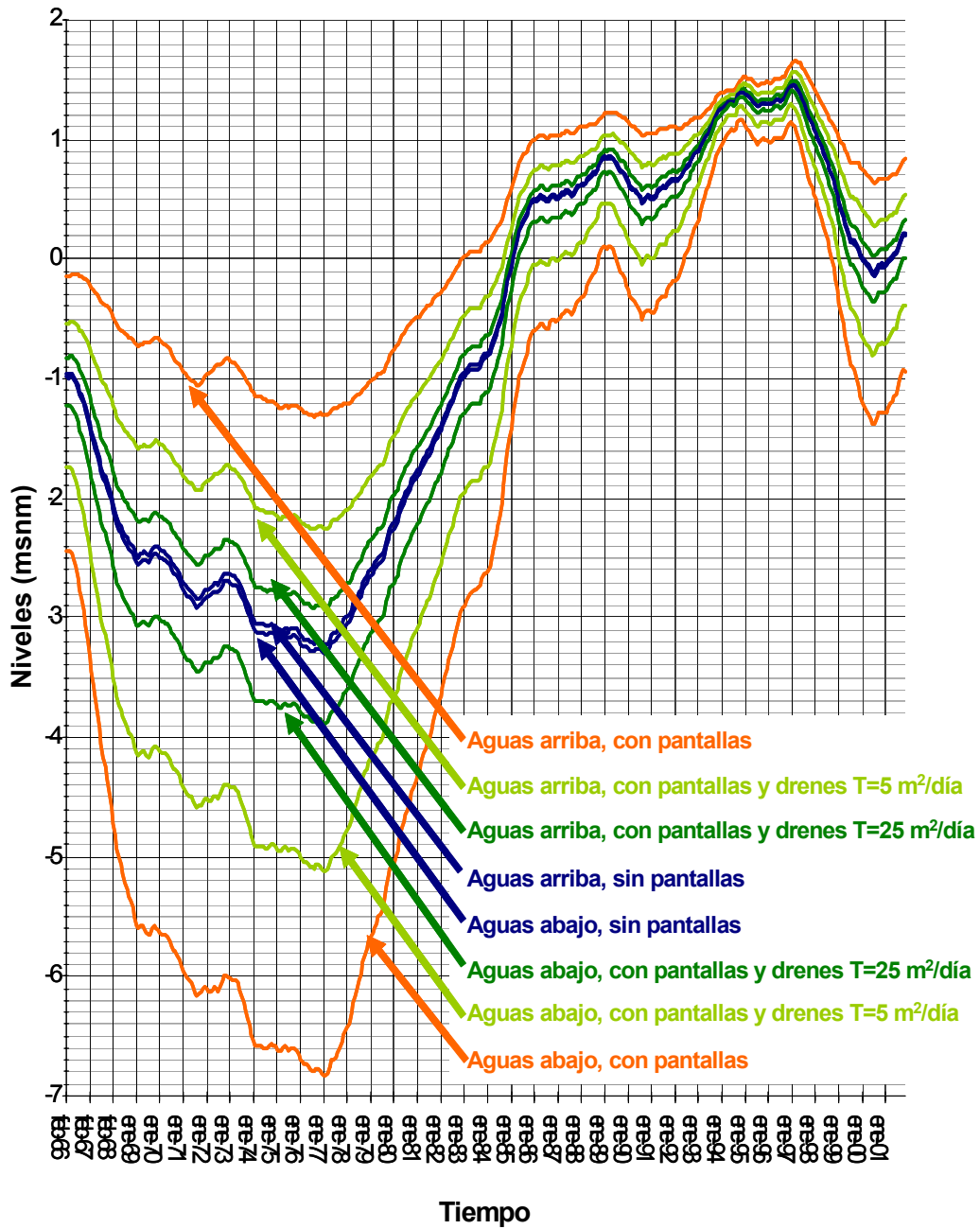


Figura 7.4 Evolución temporal de los niveles que se observarían aguas abajo y agua arriba del túnel si se diseñan las condiciones hidráulicas del período 1965-2001. Se representan los niveles con y sin pantallas y, en este caso, sin y con drenes (transmisividad equivalente de $T=5 \text{ m}^2/\text{d}$ y $25 \text{ m}^2/\text{d}$, según la densidad y diseño de los drenes).

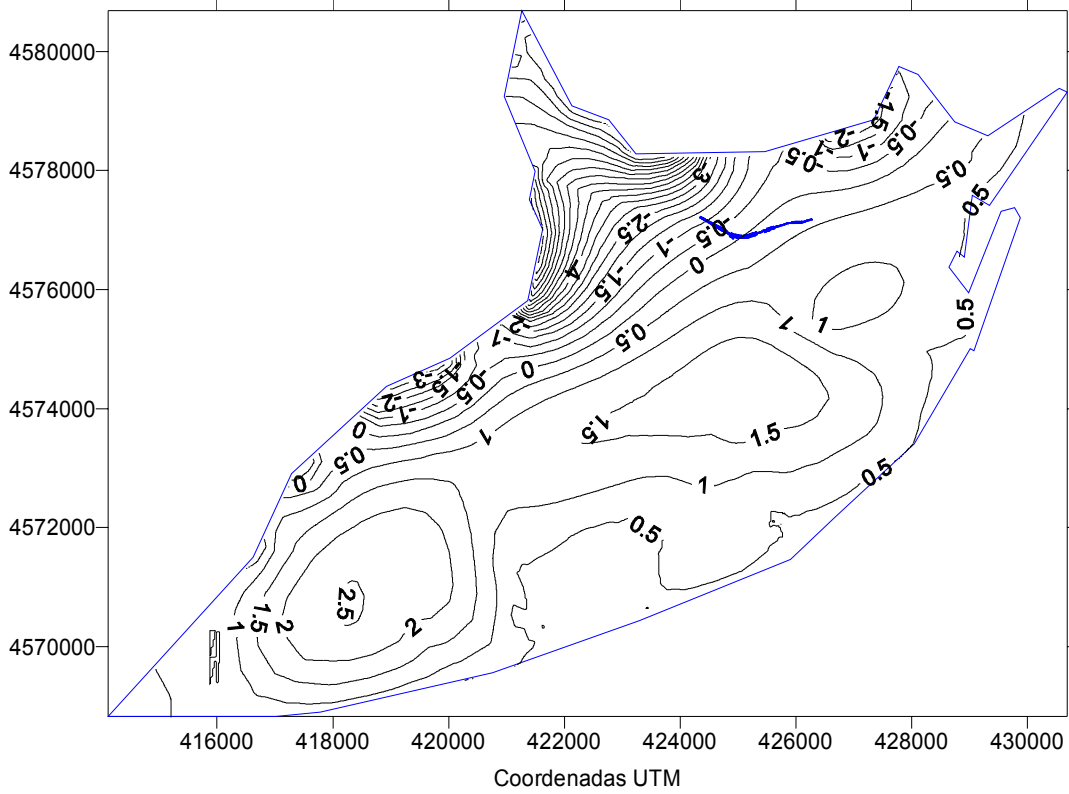


Figura 7.5 Mapa de piezometría correspondiente al mes de Diciembre 2001, obtenido en el modelo del Delta del Llobregat sin la introducción del túnel.

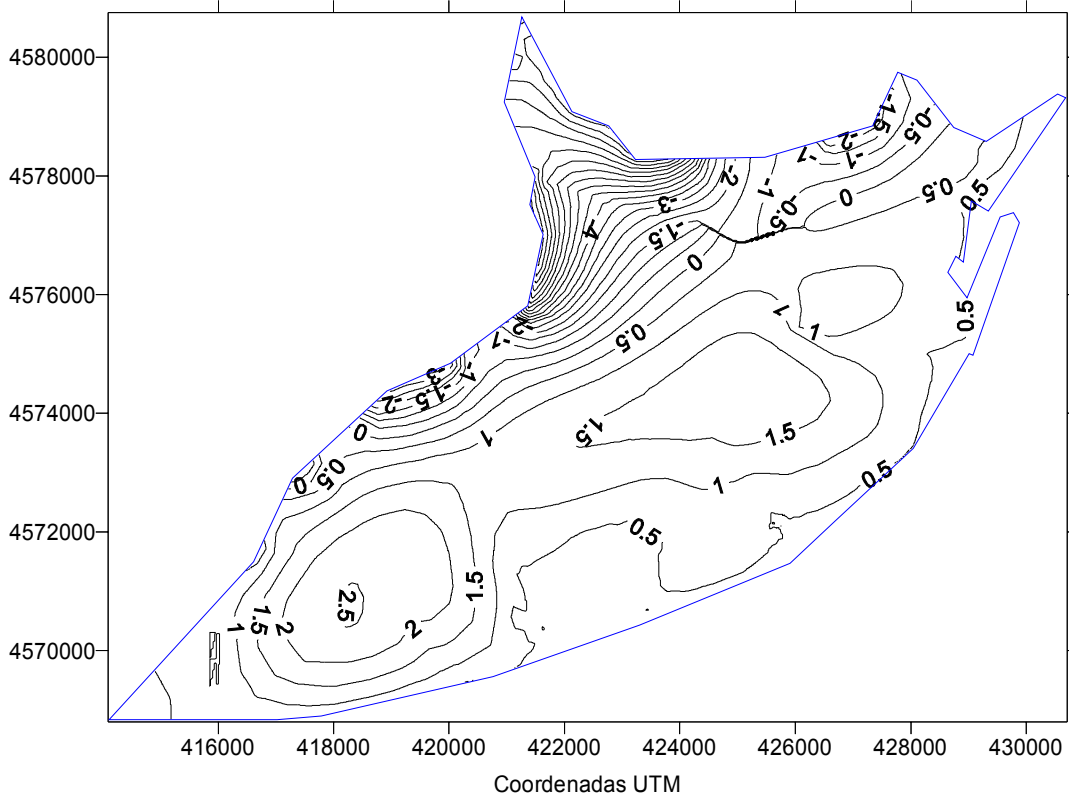


Figura 7.6 Mapa de piezometría correspondiente al mes de Diciembre 2001, obtenido en el modelo del Delta del Llobregat con la introducción del túnel.

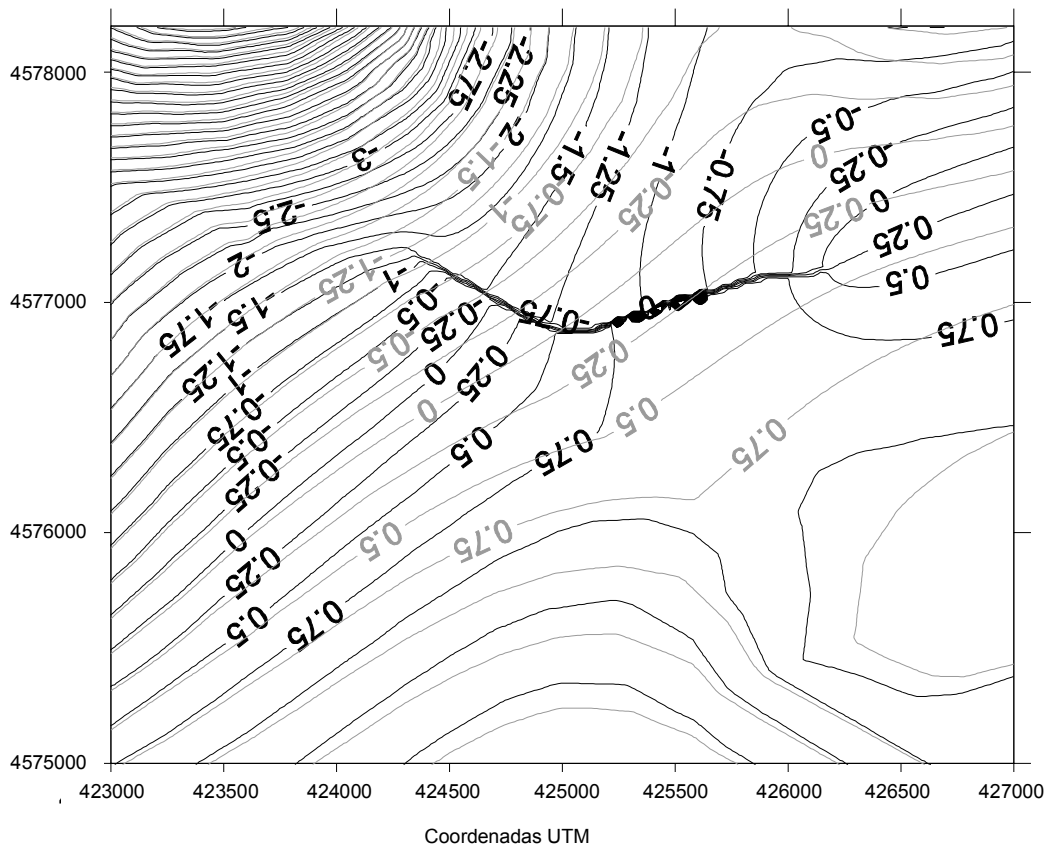


Figura 7.7 Comparación de las curvas de nivel del acuífero Superficial en la zona de la traza, correspondientes al mes de Diciembre del 2001. En gris, las curvas de nivel obtenidas sin el túnel. En negro, las curvas obtenidas con el túnel.

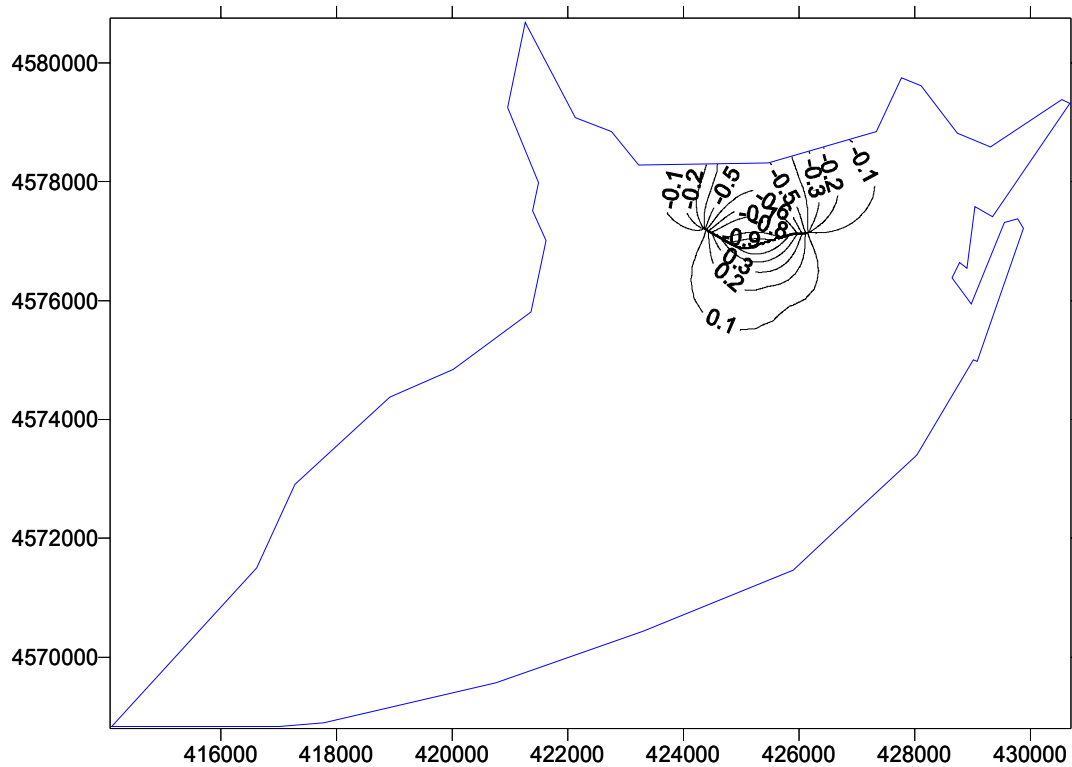


Figura 7.8 Diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel, suponiendo que no se adoptan medidas correctoras.

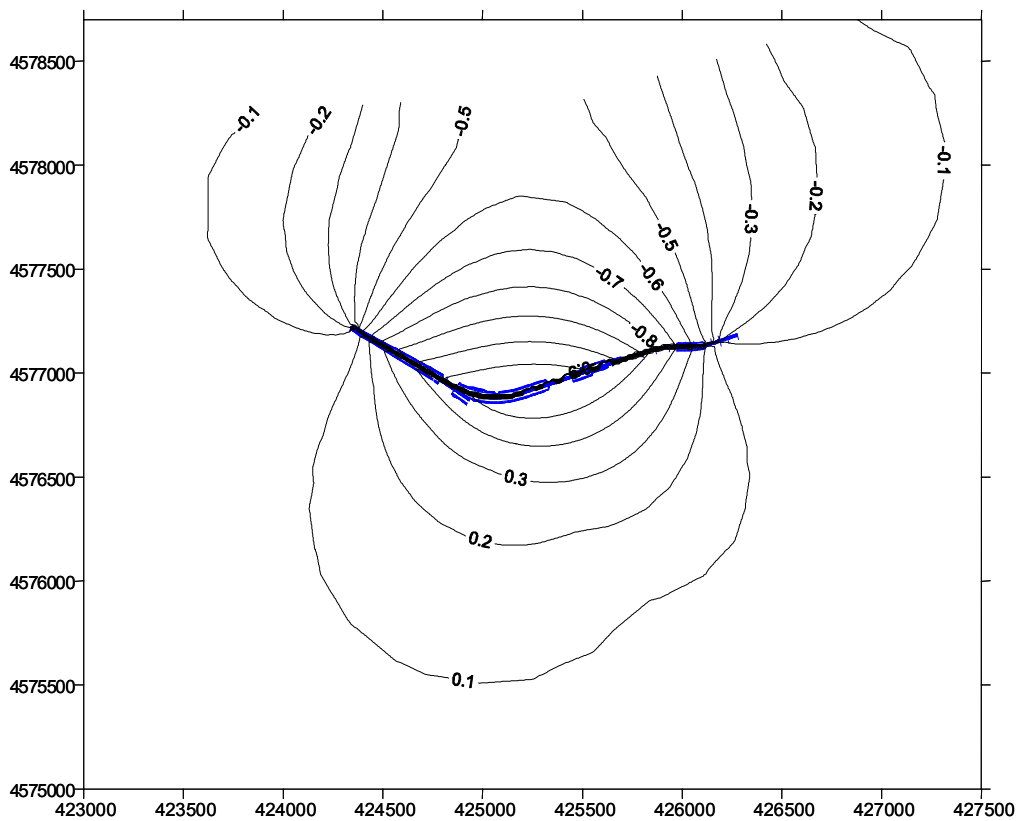


Figura 7.9 Zoom se las diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel sin medidas correctoras.

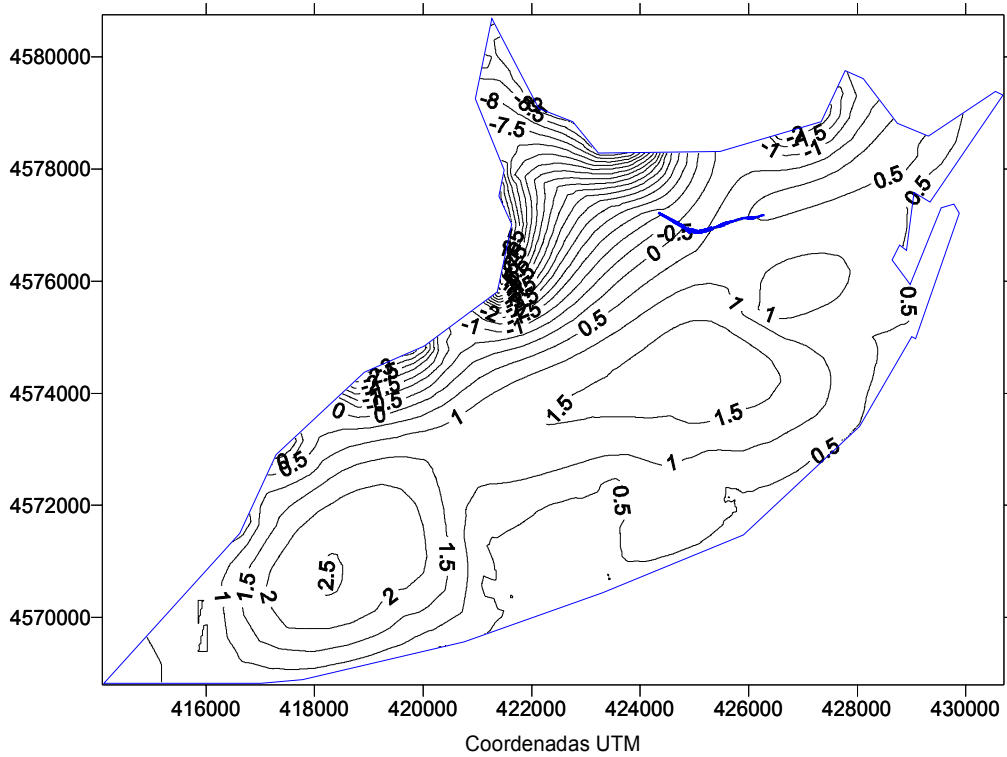


Figura 7.10 Mapa de piezometría correspondiente al mes de Diciembre 2001, obtenido en el modelo del Delta del Llobregat con la implementación del túnel y adoptando medidas correctoras mediante una Tequivalente de $5\text{m}^2/\text{d}$

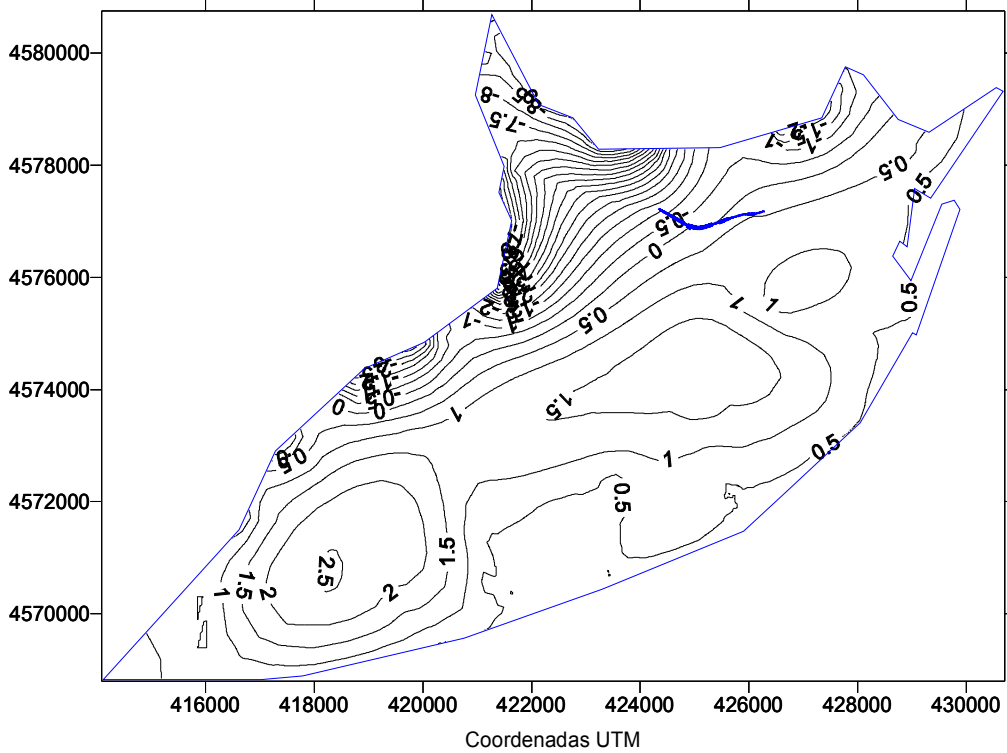


Figura 7.11 Mapa de piezometría correspondiente al mes de Diciembre 2001, obtenido en el modelo del Delta del Llobregat con la implementación del túnel y adoptando medidas correctoras mediante una Tequivalente de $25\text{m}^2/\text{d}$

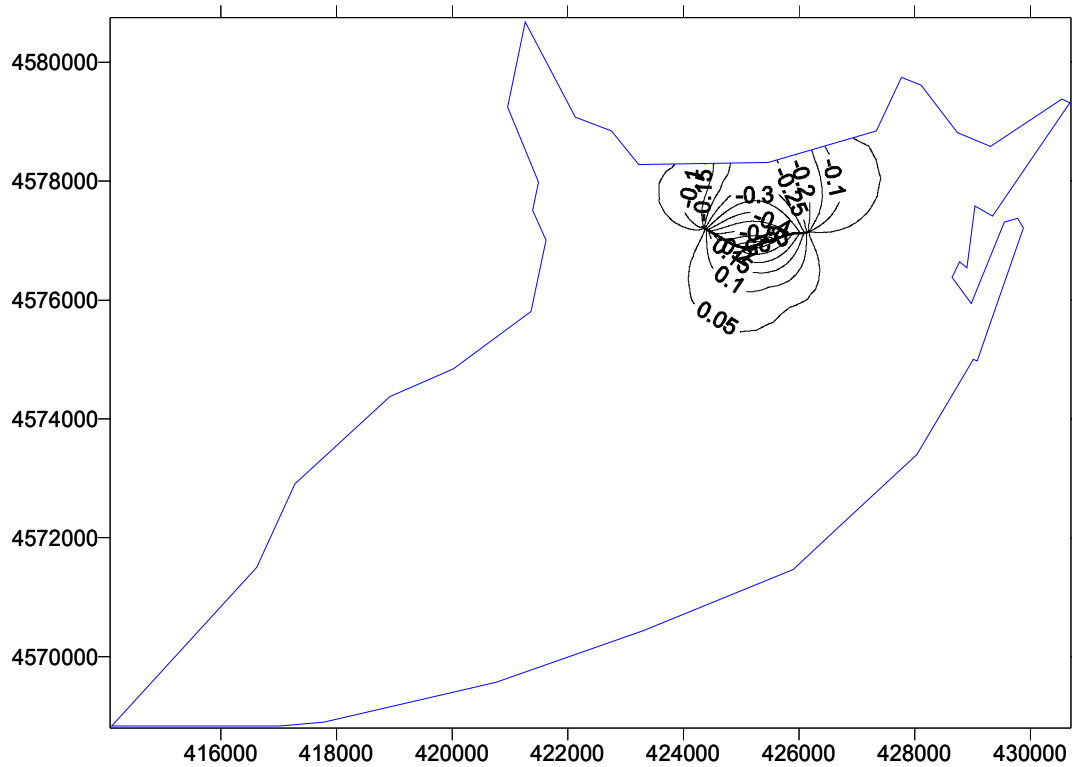


Figura 7.12 Diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel simulando medidas correctoras ($T=5 \text{ m}^2/\text{d}$)

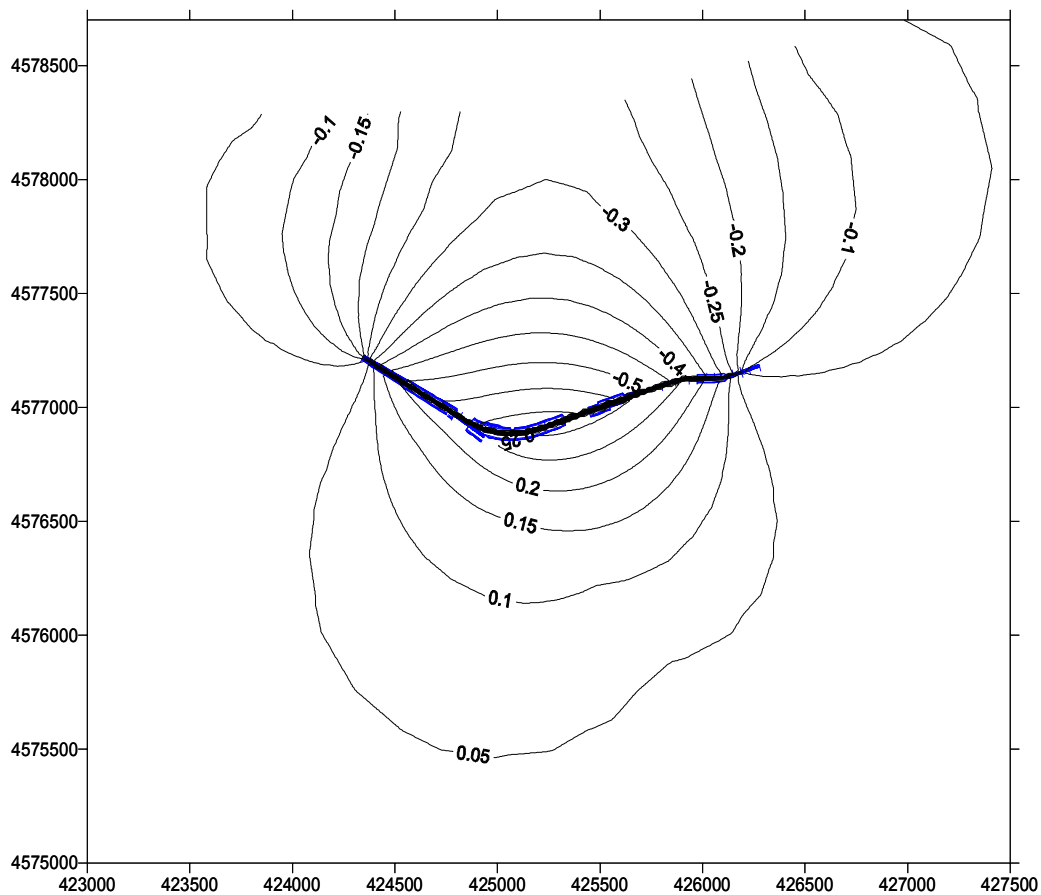


Figura 7.13 Zoom de las diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel simulando medidas correctoras ($T=5 \text{ m}^2/\text{d}$)

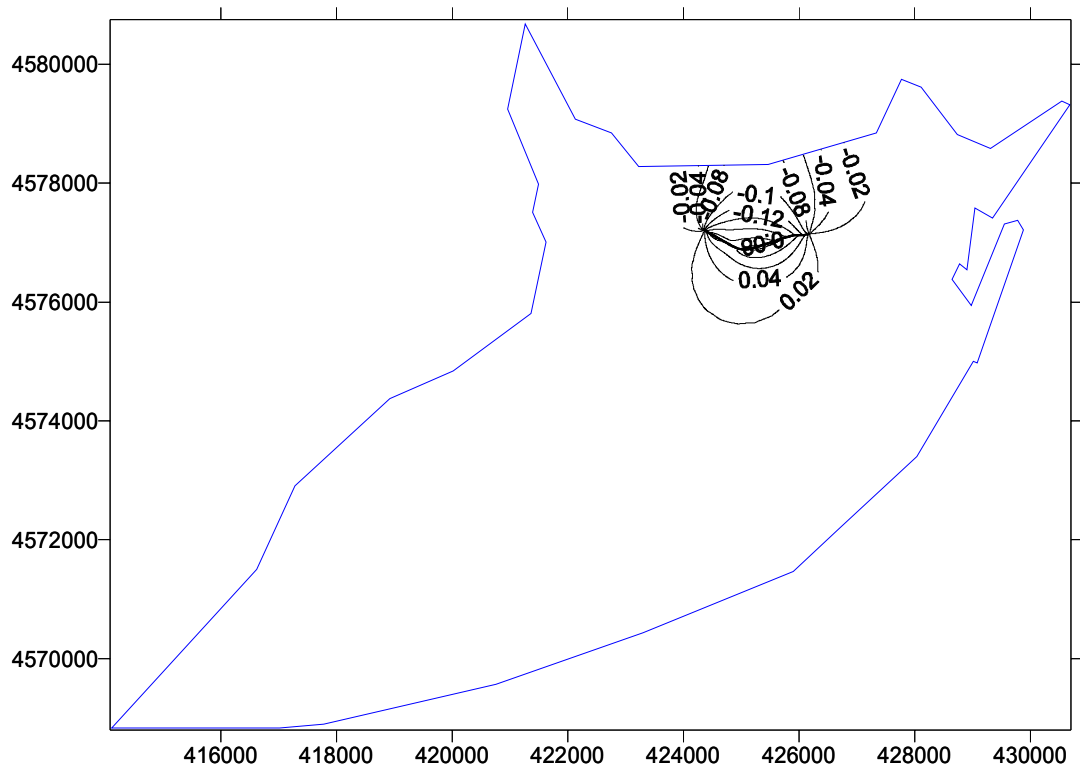


Figura 7.14 Diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel simulando medidas correctoras ($T=25 \text{ m}^2/d$)

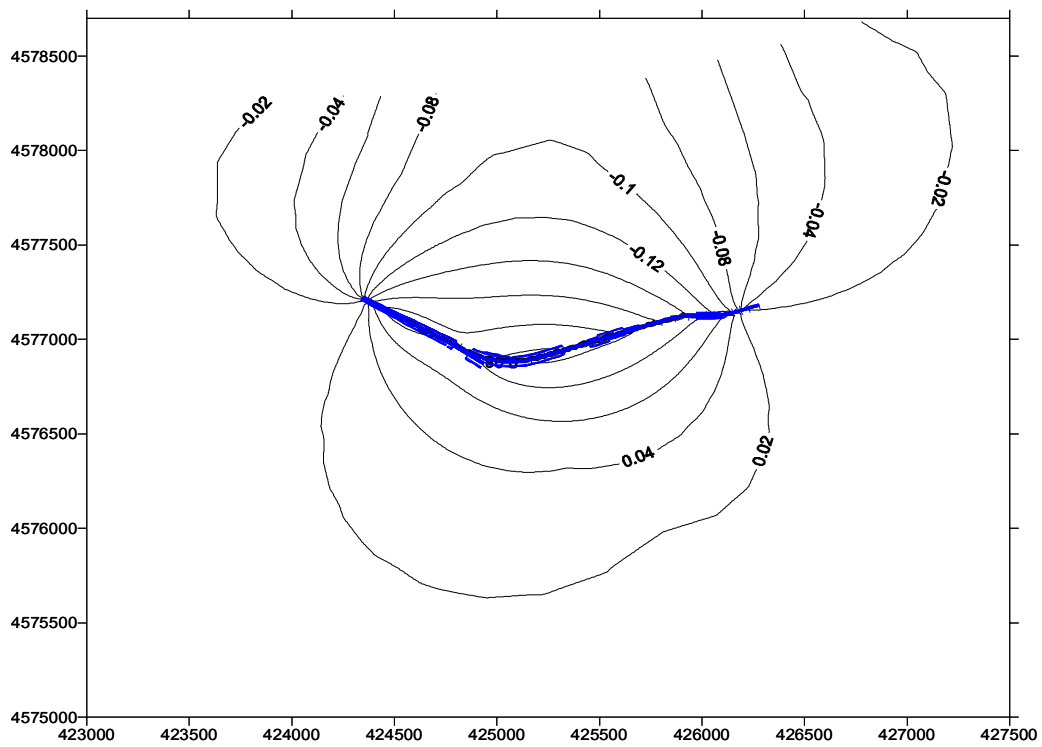


Figura 7.15 Zoom de las diferencias de niveles entre la situación sin túnel y con túnel simulando medidas correctoras ($T=25 \text{ m}^2/d$).

7.4. Diseño sistemas de drenaje

El sistema básico propuesto consta de los sondeos horizontales conectados mediante un tubo [51], *Figura 7.16*. En esencia, el sondeo de aguas arriba capta el agua, que se trasmite a través del tubo de conexión y fluye hacia el sondeo de aguas abajo. El concepto acepta variantes en función de las necesidades constructivas. Por ejemplo, la conexión podría realizarse bajo la bóveda. La única restricción es que el punto más alto debe quedar por debajo de la cota -2 msnm para asegurar el funcionamiento del sistema durante la mayor parte del tiempo.

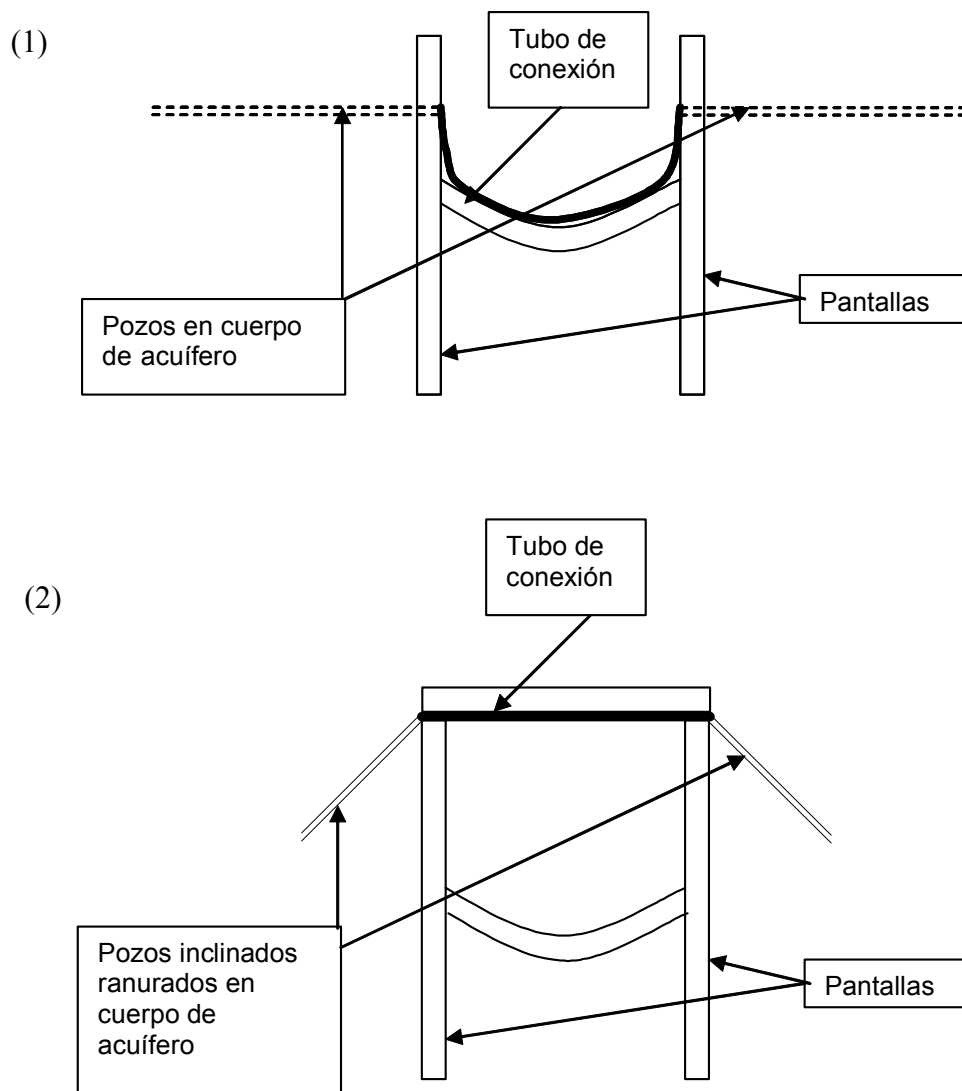
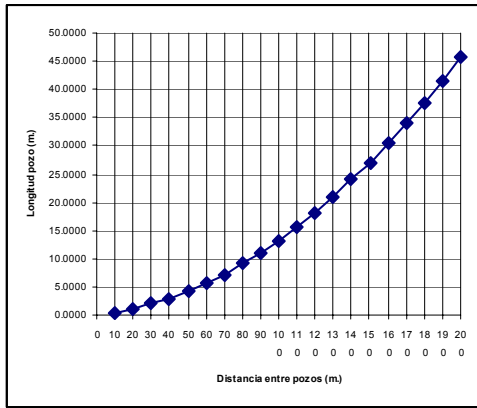


Figura 7.16 Propuestas para controlar el efecto barrera: (1) dejar un tubo de conexión entre lanzas atravesando las pantallas en la contrabóveda, (2) tubo de conexión bajo el nivel freático bajo la losa superior. La única restricción es que el punto más alto del sistema de drenaje quede a una cota inferior a la -1 msnm. Si se opta por la solución (2), el sistema debería ser totalmente estanco.

Tabla 7.3 Resultados del cálculo de dimensionamiento de los pozos horizontales (unidades en m-día).

Transmisividad equivalente (m ² /d):	T _{eq} =	25.0000
Distancia entre pantallas (m):	D _{pan} =	13.0000
Transmisividad acuífero (m ² /d):	T _{ac} =	500.0000
Espesor acuífero (m):	b _{ac} =	7.0000
Diámetro pozo (m):	D _p =	0.1000



Distancia entre pozos (m), L:	Longitud pozo (m), L _p :
50	4.2243
100	13.2563
200	45.7434

La longitud de los pozos horizontales se ha obtenido a partir de la siguiente aproximación deducida de suponer flujo radial y lateral hacia los pozos:

$$\Delta h_{\max.} = \Delta h_{\text{lateral}} + \Delta h_{\text{radial}} \quad (1)$$

Aproximando cada uno de los términos, resulta:

$$\Delta h_{\max.} = \frac{qL^2}{8Kb_{ac}Lp} + \frac{qL}{2\pi KLp} \ln\left(\frac{b^*}{Dp}\right) \quad (2)$$

donde q es el flujo natural [$q = Kb_{ac}grad(h)$], L la distancia entre sondeos, K la conductividad del medio, b_{ac} el espesor del acuífero, Lp la longitud de los pozos y Dp su diámetro.

A partir de la ecuación, e imponiendo que el caudal unitario que atravesará las pantallas proveniente de los pozos sea igual al flujo natural, se deduce una transmisividad equivalente para el tramo entre pantallas.

$$T_{eq.} \frac{\Delta h_{\max.}}{\left(\frac{D_{pan}}{2}\right)} = Tgrad(h)_{nat} = q \quad (3)$$

Sustituyendo en la ecuación (2), se obtiene:

$$Lp = \frac{T_{eq.}}{T_{ac.} \times D_{pan.}} \times \left(\frac{L^2}{4} + \frac{b_{ac.} \times L \times \ln\left(\frac{b^*}{Dp}\right)}{\pi} \right) \quad (4)$$

De aquí resulta una longitud de 13 m para distancias entre pozos de 100 m. A ello habría que añadir 2 m de espesor de pantalla y de zona no ranurada, resultando un total de 15 m. Si se estimase que la longitud no debería exceder los 10 m, se deduciría una distancia entre pozos de 75 m.