

DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA
Y MEDIO AMBIENTE



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

***CONTROL DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS
EN LA INGENIERIA CIVIL.
INTERACCIÓN ENTRE LA OBRA Y EL MEDIO
HIDROGEOLOGICO, SINTESIS DE METODOS
DE CONTROL Y APLICACIÓN DE MODELOS
MATEMATICOS***

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Alejandro J. Ferrer Granell
Director : Eduardo Cassiraga

Valencia, Diciembre 2010

Introducción

Riesgos previsibles. Patologías

Aportaciones del TFM. Aplicación a un caso real.

Conclusiones



Introducción

- El desarrollo urbanístico conlleva escasez de suelo urbano.
- Incrementar la rentabilidad de ese suelo pasa por un mejor aprovechamiento en profundidad y en altura.
- Los trabajos en profundidad con frecuencia interaccionan con el agua subsuperficial.
- El entendimiento de la interacción “**suelo-agua subterránea-obra**”, junto con el conocimiento de los **sistemas de control y monitoreo**, condicionará el desarrollo del proyecto.

- Ejecutar una excavación por debajo del nivel freático, conlleva **riesgo de inestabilidad o inundación**, si no se adoptan las medidas oportunas
- Los **pozos de bombeo** correctamente diseñados, solos o en combinación con barreras físicas, son la **solución más conveniente y económica**.
- La red de pozos dependerá de la naturaleza del terreno, de la profundidad de la excavación y de la existencia o no de barreras físicas.

- La **modelación matemática analítica y numérica**, en combinación con la práctica que da la experiencia, se presenta como herramienta adecuada para el diseño de sistemas de control de aguas subterráneas, en **escenarios sencillos y complejos respectivamente**.
- Este trabajo pretende aproximar los aspectos prácticos de la teoría de hidráulica de captaciones en medios porosos, en combinación con los sistemas esenciales de control del agua subterránea.

- Se presenta una **metodología** sistemática para el análisis de una excavación que interaccione con el agua subterránea, en función de si existen **barreras verticales confinantes, barreras parciales o ausencia de ellas.**
- En este trabajo, es analizado exhaustivamente un caso de obra real, con barreras verticales confinantes. Se aplica un **modelo analítico, como aproximación grosera** y un **modelo numérico**, constatando la versatilidad de la modelación, analizando distintos escenarios, lo que permite resolver el problema de forma **eficiente, segura y sostenible** económica y medioambiental.

Riesgos previsibles. Patologías

• **Riesgos previsibles** : Deslizamiento de taludes.

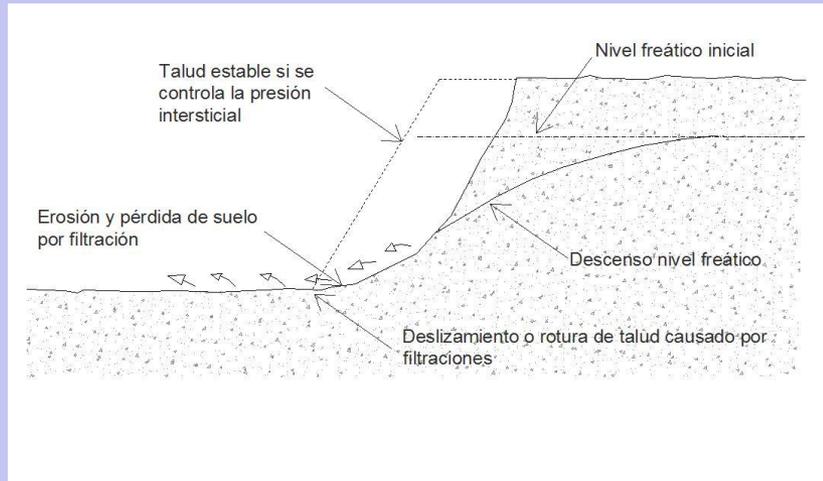


Figura 2.10.- Deslizamiento de un talud causado por filtración a la excavación (CIRIA C515, 2000).

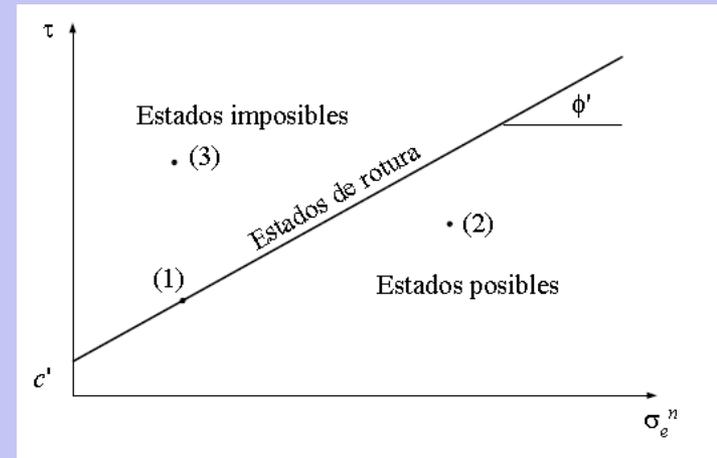


Figura 2.11.- Línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura del suelo.

Tipo de suelo	ϕ' grados	
	Suelto	Denso
Limo	27 a 30	30 a 34
Arena limosa	27 a 33	30 a 35
Arena uniforme	28	34
Arena bien graduada	33	45
Grava arenosa	35	50

Tabla 2.4.- Valores de ϕ' para suelos granulares.

- **Riesgos previsibles** : Sifonamiento, fluidificación de suelo

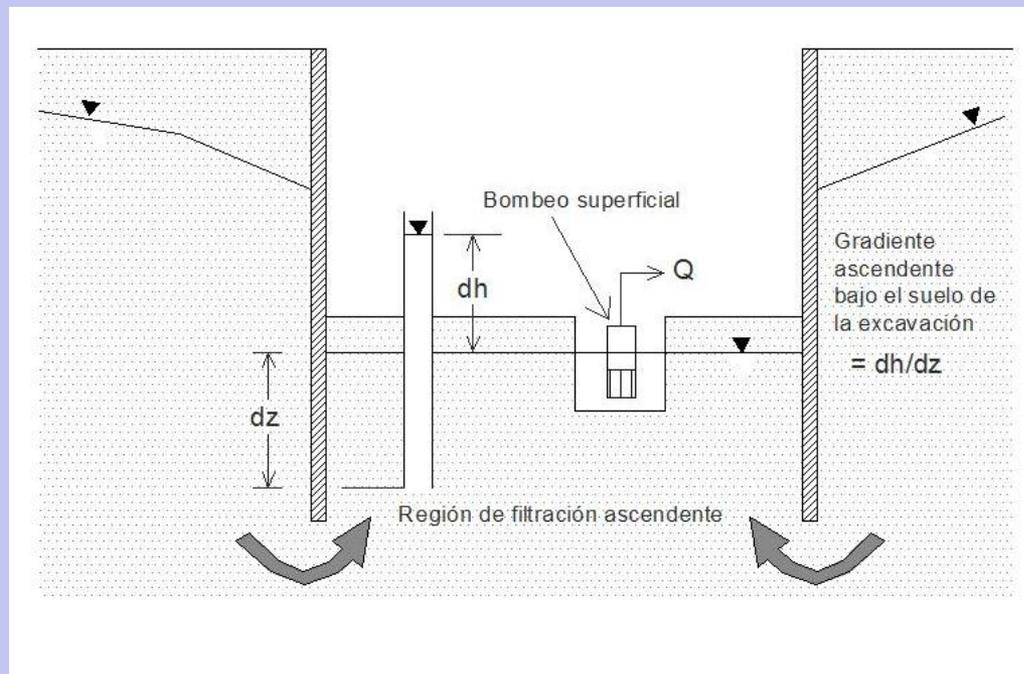


Figura 2.12.- Sifonamiento o fluidificación de suelo (CIRIA C515, 2000).

• **Riesgos previsibles : Rotura de fondo.**

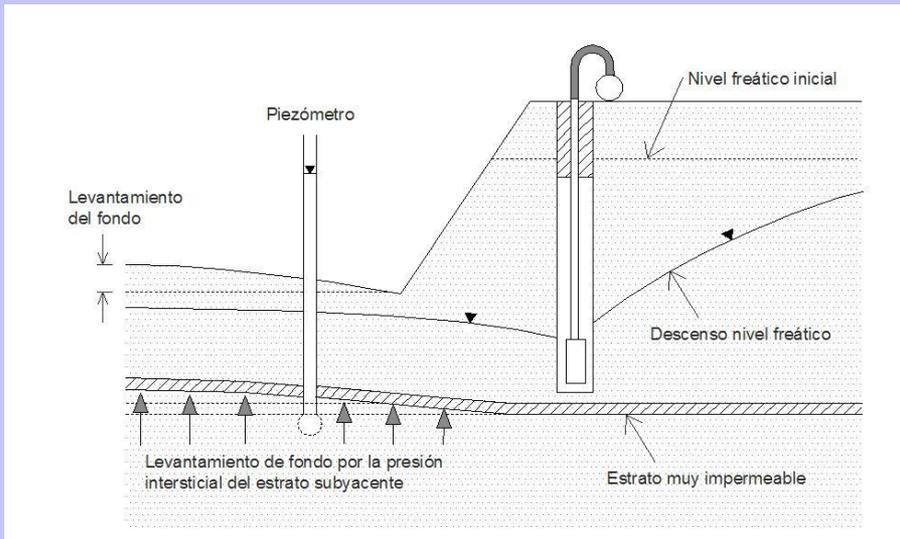


Figura 2.13.- Rotura o levantamiento de fondo en excavación libre (CIRIA C515, 2000)

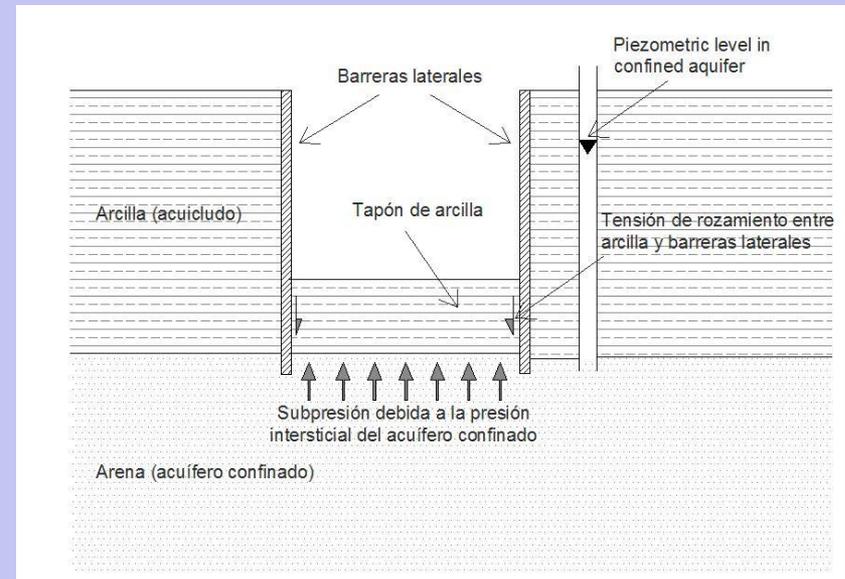


Figura 2.14.- Rotura o levantamiento de fondo en excavación con diafragma vertical (CIRIA C515, 2000).

•Riesgos imprevisibles - Patologías : Aguas surgentes en fondo

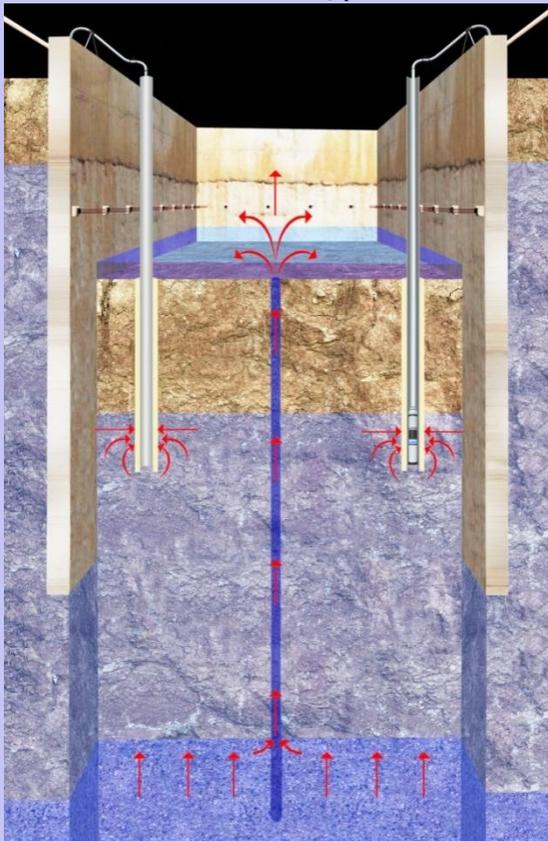


Figura 2.16.- Imagen general de surgencia en fondo de excavación drenada con pozos de baja capacidad. Valencia, 2009 (Cortesía de FERRER, S.L.).

•Riesgos imprevisibles - Patologías : Filtaciones laterales



Figura 2.22.- Filtración lateral de agua a través de fallo de construcción de muro pantalla
(Cortesía de FERRER, S.L.).



Figura 2.20.- Filtración lateral de agua a través de las planchas de un tablestacado
(Cortesía de MORETRENCH).

Posibles efectos derivados de provocar descenso del nivel freático.

- Reducción del rendimiento de pozos próximos. Análisis de posible recarga.
- Riesgo de intrusión salina. Aceleración de plumas contaminantes.
- Degradación de estructuras de madera soterradas que no se hallen debidamente tratadas.
- Afectación a humedales próximos.

Posibles efectos por o a construcción de estructuras enterradas.

- Efecto barrera o presa, si la estructura es lineal y perpendicular al flujo natural.
- Drenaje, si la estructura es lineal y paralela al flujo principal.
- Elevación del potencial hidráulico por reducción de explotación de acuífero, puede someter a subpresión inaceptables y/o filtraciones a la estructura preexistente.

Aportaciones del TFM Aplicación a un caso real

**Metodología para la implantación de un sistema de bombeo.
Modelos analíticos / Modelos Numéricos**

Un modelo analítico puede ser utilizado como medio para obtener una grosera aproximación ante los siguientes supuestos:

- a) Excavación con barreras impermeables en todo su perímetro, por ejemplo muros pantalla, tablestaca o muro de pilotes.
- b) Con barreras impermeables en parte de su perímetro.
- c) Sin barreras impermeables, confiando la estabilidad de las tierras al talud en todo su perímetro

Un modelo numérico, presenta mayor versatilidad admitiendo numerosos escenarios, lo que permite mejores aproximaciones de la realidad al cálculo teórico.

Metodología para la implantación de un sistema de bombeo. Modelos analíticos

- a) **Excavación con barreras impermeables en todo su perímetro, por ejemplo muros pantalla, tablestaca o muro de pilotes.**
1. Identificación geométrica de la parcela, fijando área, cota de máxima excavación, cota de empotramiento de pantalla.
 2. Identificación de las características geomecánicas del suelo, conductividad hidráulica (ensayo de bombeo, métodos tabulados, empíricos), puntos singulares de curvas granulométricas, cohesión, densidad.
 3. Ante suelos estratificados, obtener la conductividad hidráulica equivalente, en su componente vertical.
 4. Establecer condiciones de contorno y base de cálculo, cumplimentado el siguiente esquema

Metodología para la implantación de un sistema de bombeo. Modelos analíticos

5. El valor de Q bajo estas condiciones puede ser estimado como sigue:

$$Q = K_v A \frac{\Delta h}{l} = k_v A \frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2}$$

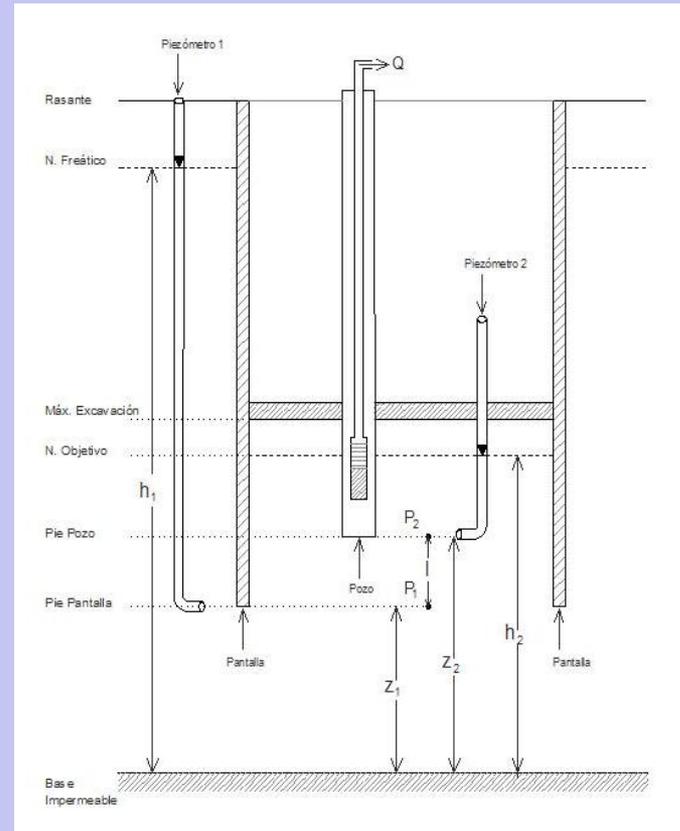


Figura 4.15 – Esquema simplificado de alturas hidráulicas, en condiciones ideales estáticas

**Metodología para la implantación de un sistema de bombeo.
Modelos analíticos**

6. Conocido la estimación del caudal global a bombear, debemos determinar el número de pozos. Conviene hallarse familiarizado con las técnicas de perforación, interrelacionando eficientemente estas con los diámetros en función del tipo de terreno.
7. Nuestra experiencia propone considerar inicialmente puntos de captación de 5 l/s, por tanto bombas de 4", implica entubación 140 mm y perforación de 250 mm. Si la matriz de pozos resultara excesiva, considerar 20 l/s, por tanto bombas de 6", implica entubación 225 mm y perforación de 300 mm.

Metodología para la implantación de un sistema de bombeo. Modelos analíticos

8. Una segunda restricción vendría impuesta con la limitación de velocidad impuesta al flujo que es bombeado en cada pozo, para no provocar erosión de suelo por excesivos gradientes. Se puede aplicar la recomendación mostrada en la tabla para no exceder el caudal de bombeo por metro de pozo “mojado”.

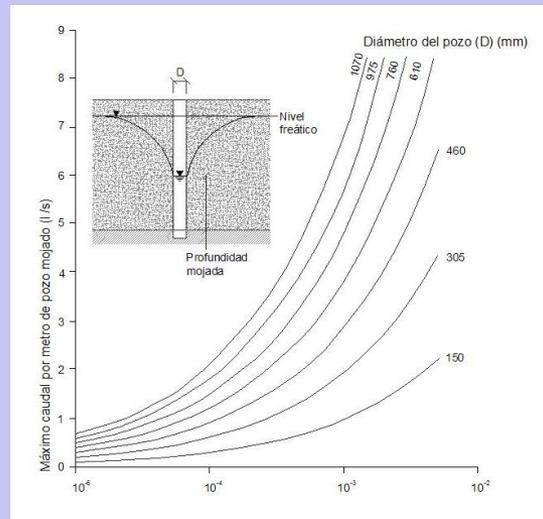


Figura 4.16 – Curvas de recomendación de máximo caudal de bombeo por metro lineal de pozo mojado, en función de la conductividad del suelo perforado (CIRIA R113, 1986).

**Metodología para la implantación de un sistema de bombeo.
Modelos analíticos**

9. Conocido el caudal total a bombear y el límite por metro de pozo “mojado”, determinaremos el número de metros mojados necesarios y por tanto, el número de pozos y su profundidad, contrastando esta con la establecida en el cálculo realizado en el punto 5. Se debiera analizar si existe riesgo de rotura de fondo por existencia de un segundo acuífero desconectado subyacente.
10. Este proceder en el cálculo plantea escenario desfavorable, dado que fue tenida en cuenta la altura hidrostática del nivel freático en el pie de pantalla. En realidad, en el pie de pantalla, esta altura se ve reducida debido al régimen dinámico del flujo, lo que puede verificarse mediante un modelo numérico

**Metodología para la implantación de un sistema de bombeo.
Modelos analíticos**

b) Con barreras impermeables en parte de su perímetro.

1. Identificación geométrica de la parcela, fijando área, cota de máxima excavación, cota de empotramiento de pantalla.
2. Identificación de las características geomecánicas del suelo, conductividad hidráulica (ensayo de bombeo, metodos tabulados, empíricos), puntos singulares de curvas granulométricas, cohesión, densidad.
3. Ante suelos estratificados, obtener la conductividad hidráulica equivalente, en su componente horizontal.
4. Podremos aplicar formulación básica de hidráulica de captaciones, evaluando a diferentes caudales, los descensos provocados a diferentes distancias.

**Metodología para la implantación de un sistema de bombeo.
Modelos analíticos**

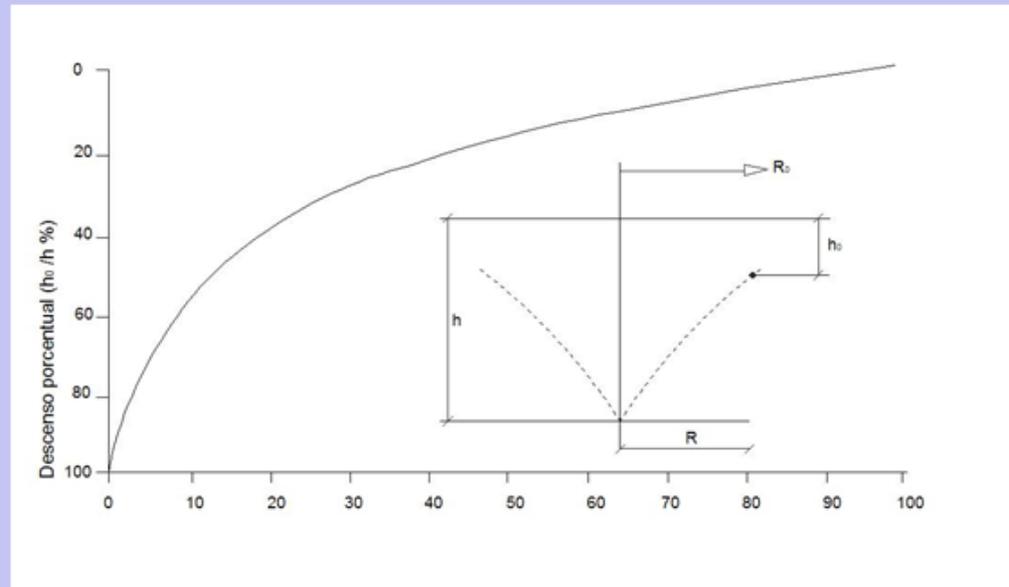
5. Puede ser aplicado el principio de superposición o descensos acumulativos, teniendo en cuenta sus limitaciones y asunciones. Se evalúa el descenso acumulado en el punto más desfavorable, generalmente en el centro de la parcela.
6. La existencia de barrera impermeable, permite la aplicación de la teoría de las imágenes, adicionando los descensos provocados por los pozos virtuales. Como en el caso anterior, se debe tener en cuenta las limitaciones y asunciones implícitas.
7. Son de aplicación las recomendaciones de restricciones referidas a la velocidad del flujo de acceso al pozo, con la intención de evitar la erosión del suelo y arrastres.

Metodología para la implantación de un sistema de bombeo. Modelos analíticos

- c) Sin barreras impermeables, confiando la estabilidad de las tierras al talud en todo su perímetro**
1. Cálculo del caudal del “**pozo equivalente**” de las dimensiones de la obra, es decir, como si el conjunto de la obra fuera un solo “pozo teórico”. Seguidamente deberá determinarse cuantos pozos reales actuando simultáneamente equivalente a ese pozo equivalente teórico.
 2. Cálculo del **radio equivalente**.
 3. Estimación de la **conductividad hidráulica equivalente**, en su componente horizontal.
 4. Calculamos el **radio de influencia**.

Metodología para la implantación de un sistema de bombeo. Modelos analíticos

5. Cálculo del descenso necesario en el pozo real desplazado, dado que el “**pozo equivalente**” utilizado habría sido posicionado en el centro de la parcela.



**Metodología para la implantación de un sistema de bombeo.
Modelos analíticos**

6. Conocida la conductividad hidráulica y las características del “pozo equivalente”, podremos aproximar el caudal de bombeo necesario.
7. Aplicando las restricciones de velocidad de flujo de entrada al pozo, determinaremos el número de “metros mojados” de pozo necesarios.
8. Verificaremos que los diámetros de pozos de bombeo, no representa una limitación física/hidráulica para el equipamiento del bombeo necesario.

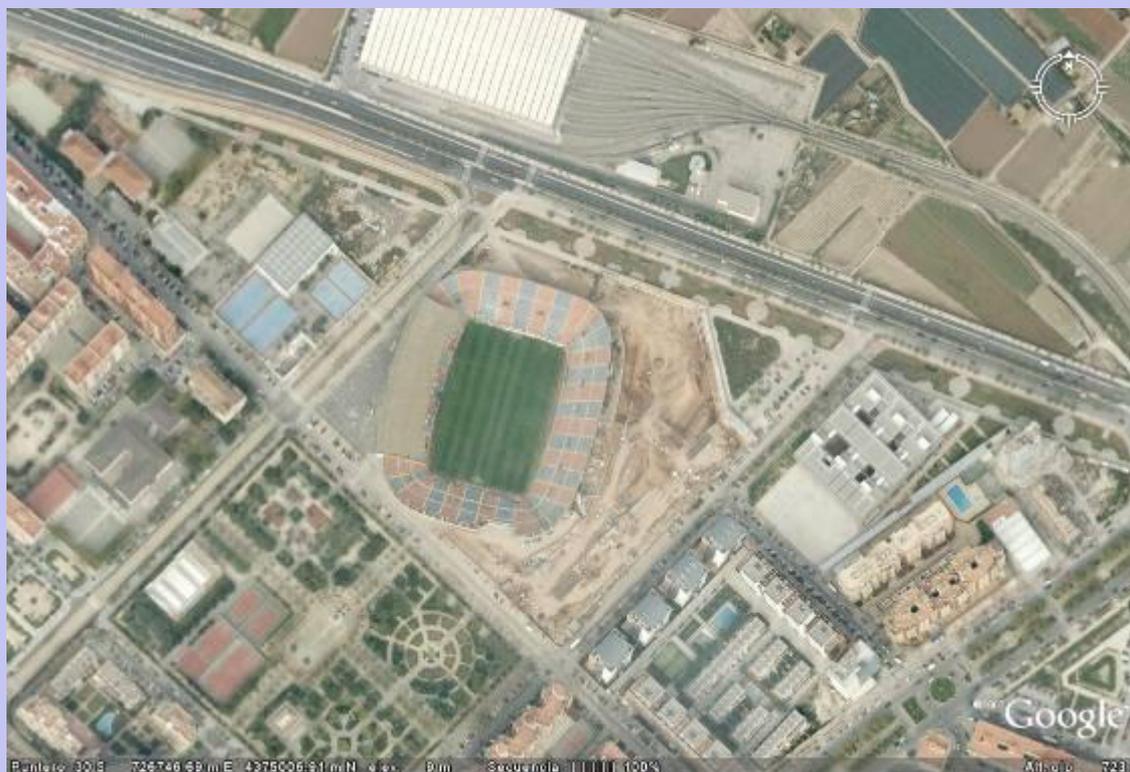
Metodología para la implantación de un sistema de bombeo. Modelos numericos

Con carácter general, se desarrolla en el TFM una metodología para el análisis de un sistema de control de nivel freático, con advertencia de algunas de sus posibilidades, versatilidad y limitaciones de los modelos numéricos. Con carácter particular es analizado un caso real.

Este caso real se corresponde con una obra singular, ejecutada en la ciudad de Valencia, calle Beata Genoveva Torres, junto al estadio de fútbol “Ciudad de Valenca”. La obra es conocida como “CENTRO COMERCIAL ARENA”.

Sobre este caso real, se revisa la **metodología analítica** (caso a) y se presenta una metodología con **métodos numericos**.

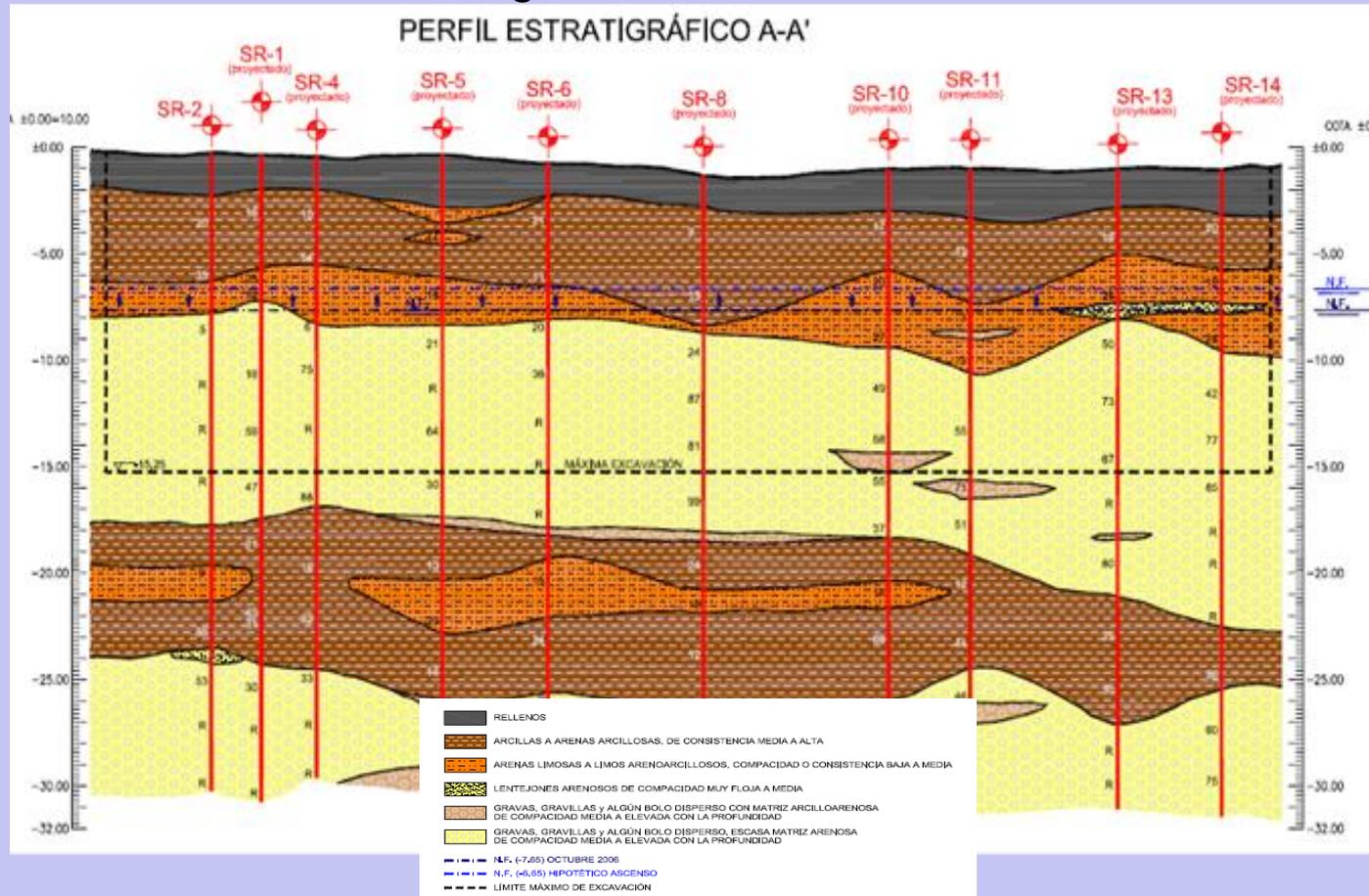
Situación : C/ Beata Genoveva Torres - Valencia



Aportaciones del TFM Análisis de un caso real



Geología - Geotecnia

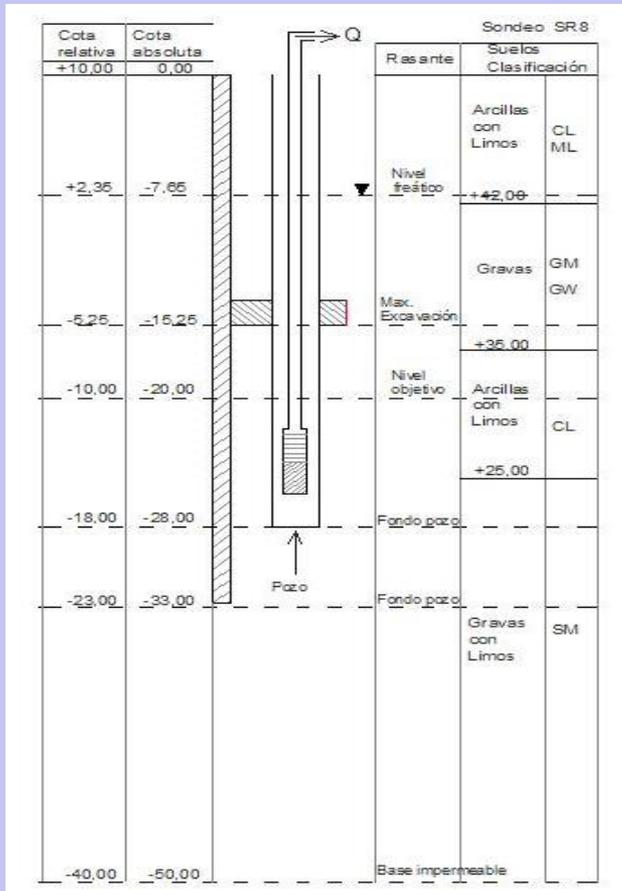


Aportaciones del TFM

Analisis de un caso real



Modelo conceptual

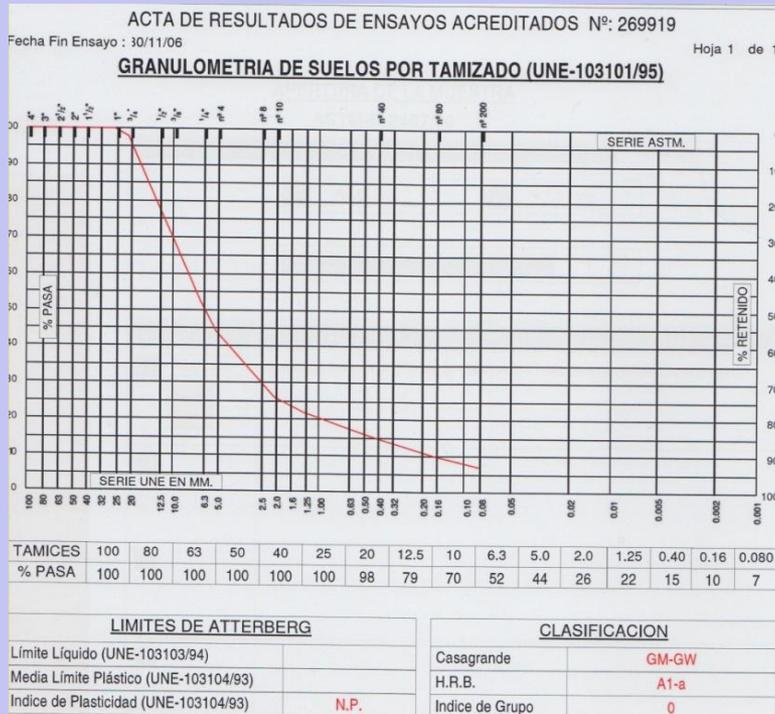


CLASIFICACION USGS	Descripción	Cotas		POTENCIA (m)
		Desde (m)	Hasta (m)	
Símbolo del grupo				
GM-GW	Gravas bien graduadas, mezclas de arena y pocos finos	-8,00	-17,00	9,00
CL	Arcilla inorgánica de plasticidad baja a media	-17,00	-25,00	8,00
SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo, mal graduada	-25,00	-50,00	25,00

Tabla 5.1 - Clasificación y potencia de los suelos saturados

Aportaciones del TFM Análisis de un caso real

Modelo analítico



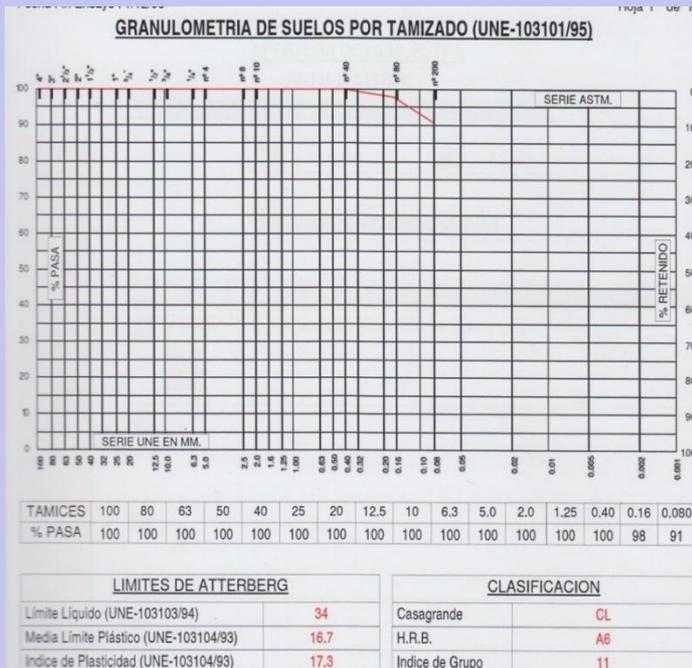
Se trata de una muestra de suelo pobremente o mal graduada, dado su coeficiente de uniformidad, por lo que su conductividad hidráulica se puede estimar a partir de la formulación sugerida por Breyev, esto es

$$K = \frac{g}{\nu} C_b D_e^2$$

Donde g es la gravedad ($9,807 \text{ m/s}^2$), ν viscosidad cinemática ($1,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ a $15 \text{ }^\circ\text{C}$), D_e tamaño efectivo del grano 10 mm y C_b es $6 \times 10^{-4} \log(500/C_u)$. Operando convenientemente resulta un valor de conductividad hidráulica horizontal de $K=1,32 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

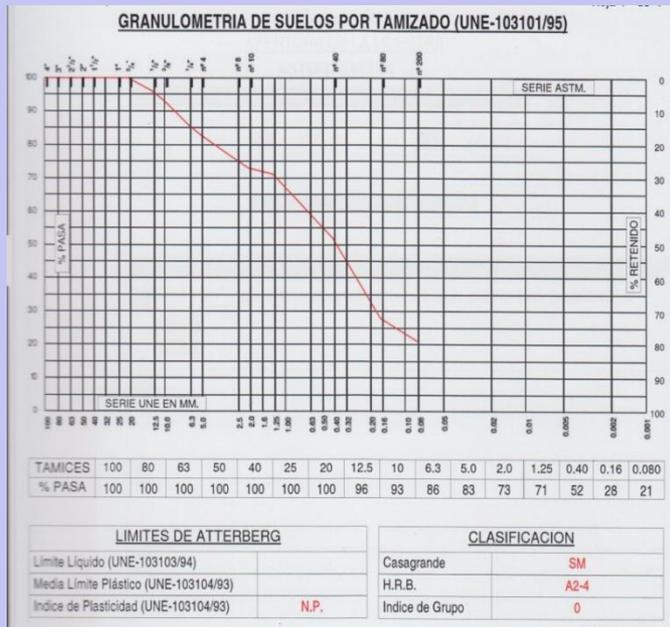
Aportaciones del TFM Análisis de un caso real

Modelo analítico



La curva de análisis granulométrico por tamizado para la potencia de suelo clasificada como CL se puede ver en la Figura 5.8. Sobre la muestra correspondiente no será posible llevar a cabo el procedimiento anterior, ya que su contenido en fino es del 91 %. Por ello partimos de un **valor característico de bibliografía** para estos suelos, que es igual a $K = 10^{-5} \text{ m/s}$

Modelo analítico



Dado que el tamaño efectivo de grano para el valor se encuentra en el rango de entre 0,1 y 3 mm y su coeficiente de uniformidad es menor a 5, se puede aplicar la **formula de Hazen**

$$K = \frac{g}{\nu} C_h f(n) D_{10}^2$$

donde $f(n)$ es $(1+10(n-0,26))$, n es la porosidad (0,38 para este caso), g es la gravedad ($9,807 \text{ m/s}^2$), ν viscosidad cinemática ($1,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ a $15 \text{ }^\circ\text{C}$), D_{10} tamaño efectivo del grano y C_h es 6×10^{-4} . Operando convenientemente resulta un valor de conductividad hidráulica horizontal de **$K=1,1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$** .

Modelo analítico

$$Q = k_v A \frac{\Delta h}{l} = k_v A \frac{h_1 - h_2}{p_1 - p_2}$$

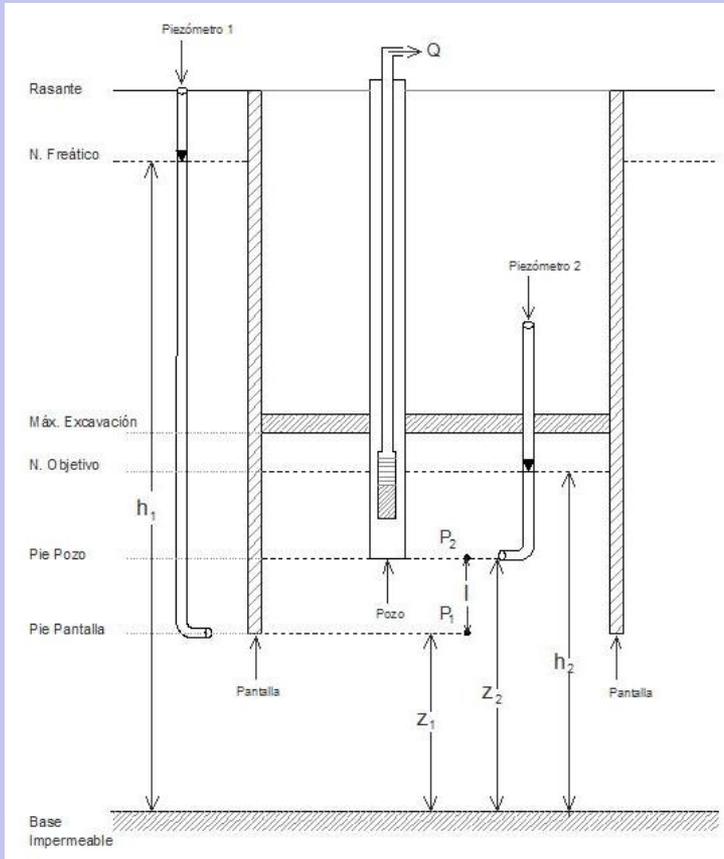


Figura 5.10 - Esquema de los elementos esenciales acotados para el primer escenario

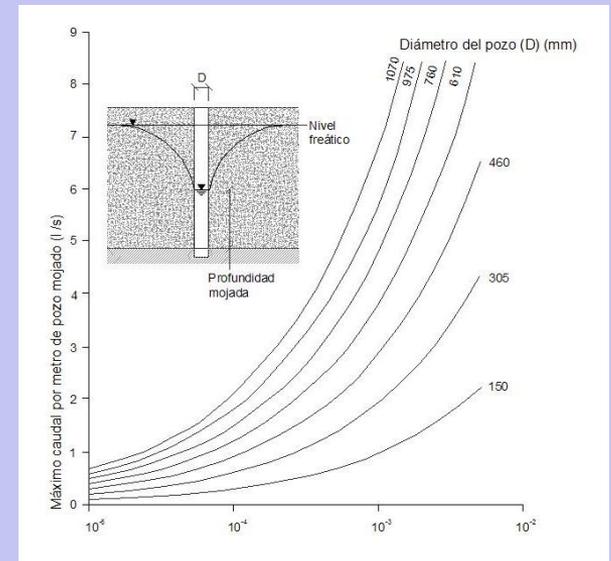


Figura 5.12 - Máximo rendimiento exigible a un pozo de bombeo (CIRIA R113, 1986).

Aportaciones del TFM Análisis de un caso real

Modelo numerico

Geometría del modelo

- Según proyecto, morfología conocida, planta y sección. Generación de malla.
- Barreras físicas, pantallas estructurales, penetración parcial vertical
- Definición de extensión del modelo (Sichart y Kryileleis) .
- Definición de elementos del modelo.
- Definición de unidades litológicas y subunidades funcionales (límites físicos, pie pantalla, pozos ...)

<i>Slice</i>	<i>Layer</i>	<i>Elevación</i>	<i>Observación/Justificación</i>	<i>Clasificación</i>
<i>S1</i>		+42,00	Techo de estrato litológico GM-GW	
<i>S2</i>	<i>L1</i>	+34,75	Máxima Excavación	GM-GW
<i>S3</i>	<i>L2</i>	+33,00	Muro de estrato litológico GM-GW	
<i>S4</i>	<i>L3</i>	+30,00	Potencial hidráulico objetivo por la acción de los bombeos	CL
<i>S5</i>	<i>L4</i>	+25,00	Muro de estrato litológico CL	
<i>S6</i>	<i>L5</i>	+22,00	Pie de pozo	SM
<i>S7</i>	<i>L6</i>	+20,00	Para conocer valores de altura hidráulica en esta cota	
<i>S8</i>	<i>L7</i>	+18,00	Para conocer valores de altura hidráulica en esta cota	
<i>S9</i>	<i>L8</i>	+17,00	Pie de pantalla	
<i>S10</i>	<i>L9</i>	+20,00	Para conocer valores de altura hidráulica en esta cota	
<i>S11</i>	<i>L10</i>	+14,00	Para conocer valores de altura hidráulica en esta cota	
<i>S12</i>	<i>L11</i>	+12,00	Para conocer valores de altura hidráulica en esta cota	
<i>S13</i>	<i>L12</i>	+09,00	Para conocer valores de altura hidráulica en esta cota	
<i>S14</i>	<i>L13</i>	+06,00	Para conocer valores de altura hidráulica en esta cota	
<i>S15</i>	<i>L14</i>	+03,00	Para conocer valores de altura hidráulica en esta cota	
<i>S16</i>	<i>L15</i>	+00,00	Base impermeable del acuífero	

Aportaciones del TFM
Analisis de un caso real

Modelo numerico

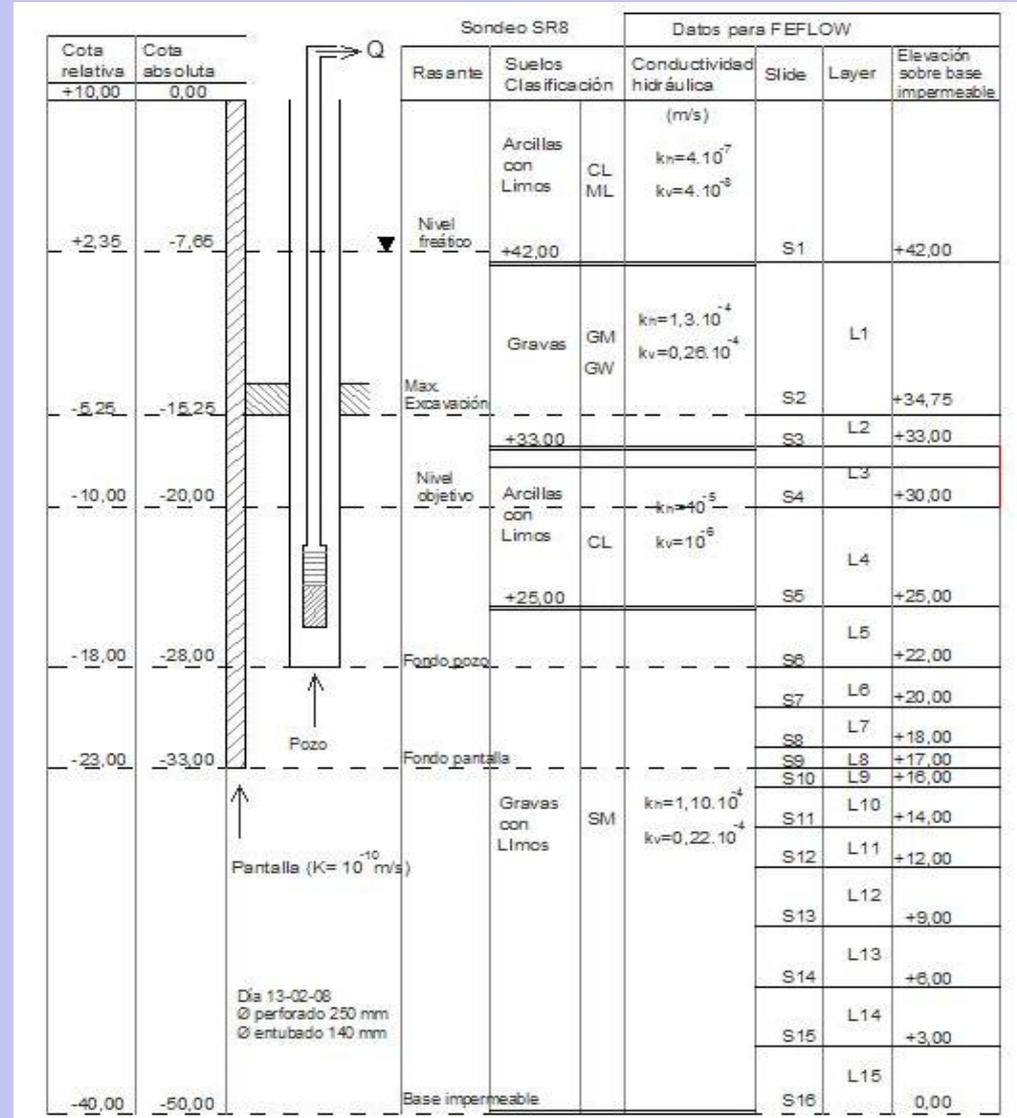


Figura 5.13 - Esquema acotado de posicionamiento de estratos y láminas del modelo numérico correlacionado con los elementos esenciales.

Modelo numerico

Asignación de parámetros

Clasificación USGS	Cotas absolutas		Potencia (m)	Kh	Kv/Kh	
	Desde	Hasta			anisotropía	Kv
CL-ML	0	-8	8,00	$4,00 \times 10^{-06}$	0,10	$0,40 \times 10^{-06}$
GM-GW	-8	-17	9,00	$1,31 \times 10^{-04}$	0,20	$0,26 \times 10^{-04}$
CL	-17	-25	8,00	$1,00 \times 10^{-05}$	0,10	$1,00 \times 10^{-06}$
SM	-25	-50	25,00	$1,14 \times 10^{-04}$	0,20	$0,22 \times 10^{-04}$

Tabla 5.3 – Conductividades hidráulicas y relaciones de anisotropía utilizadas en el modelo.

Condiciones iniciales y de contorno

- Potencial constante en los bordes (Dirichlet)
- Potencial constante en el interior de las pantallas (todos los nodos) – balance
- Evaluación de caudales

Aportaciones del TFM Análisis de un caso real

Modelo numerico

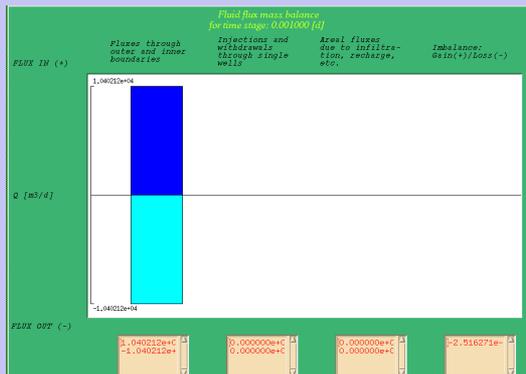


Figura 5.16 – Resultado del balance de masa. Caudal de salida del recinto apantallado por imposición del potencial constante en su interior.

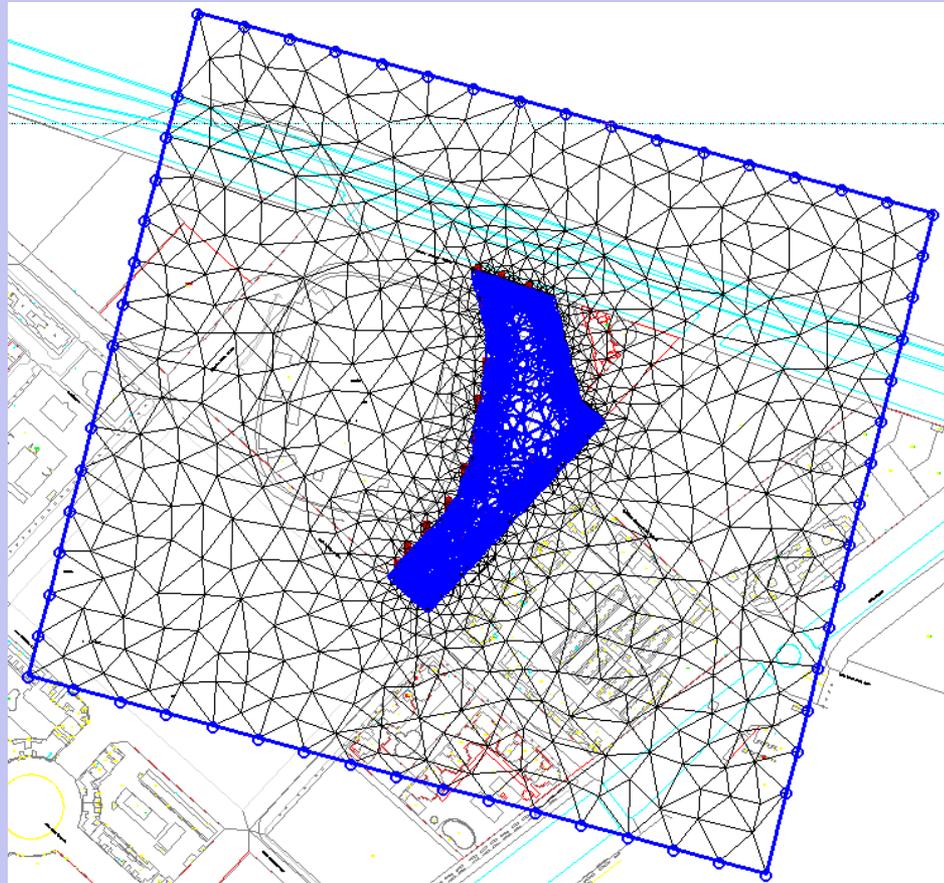


Figura 5.14 - Representación de la malla de elementos finitos superpuesta al dominio del problema y condiciones de contorno.

Los puntos o nodos destacados del contorno imponen un potencial constante de valor +42,35 m (-7,65 m) con respecto a la base de referencia del modelo. La zona central, con mayor densidad de nodos por refinamiento, se corresponde con el área en planta de la excavación. El potencial hidráulico impuesto a esta zona con referencia a la base del modelo fue de valor +30 m (-20 m).

Aportaciones del TFM Análisis de un caso real

Modelo numerico

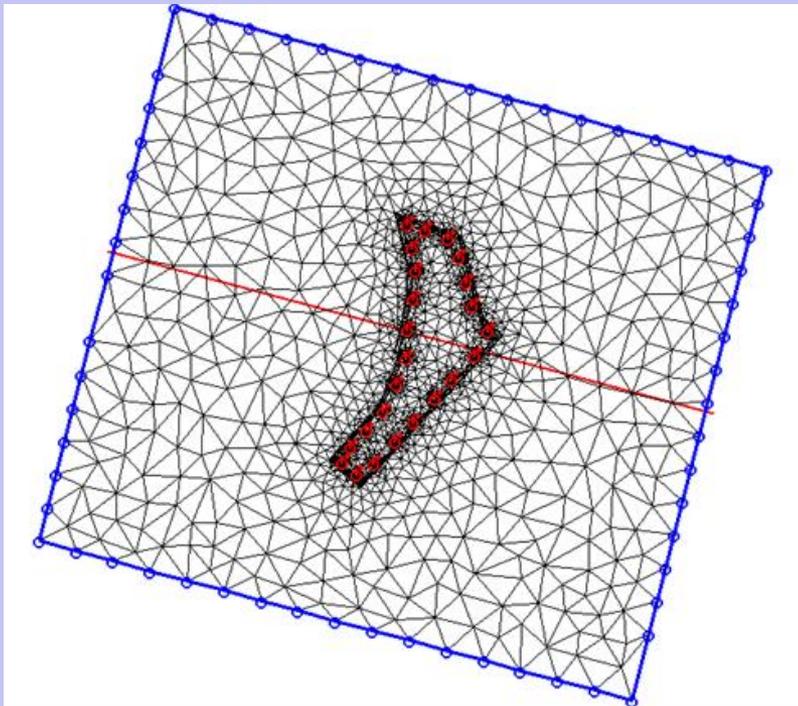


Figura 5.17 – Esquema de posicionamiento de los 24 pozos de bombeo en el interior del recinto apantallado.

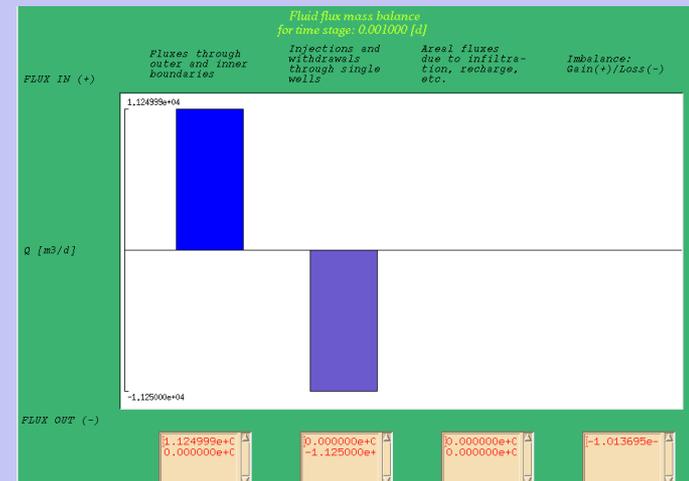


Figura 5.18 – Resultado del balance de masa. Caudal de salida del recinto apantallado por la acción de 24 pozos en su interior.

Aportaciones del TFM *Análisis de un caso real*

Modelo numerico

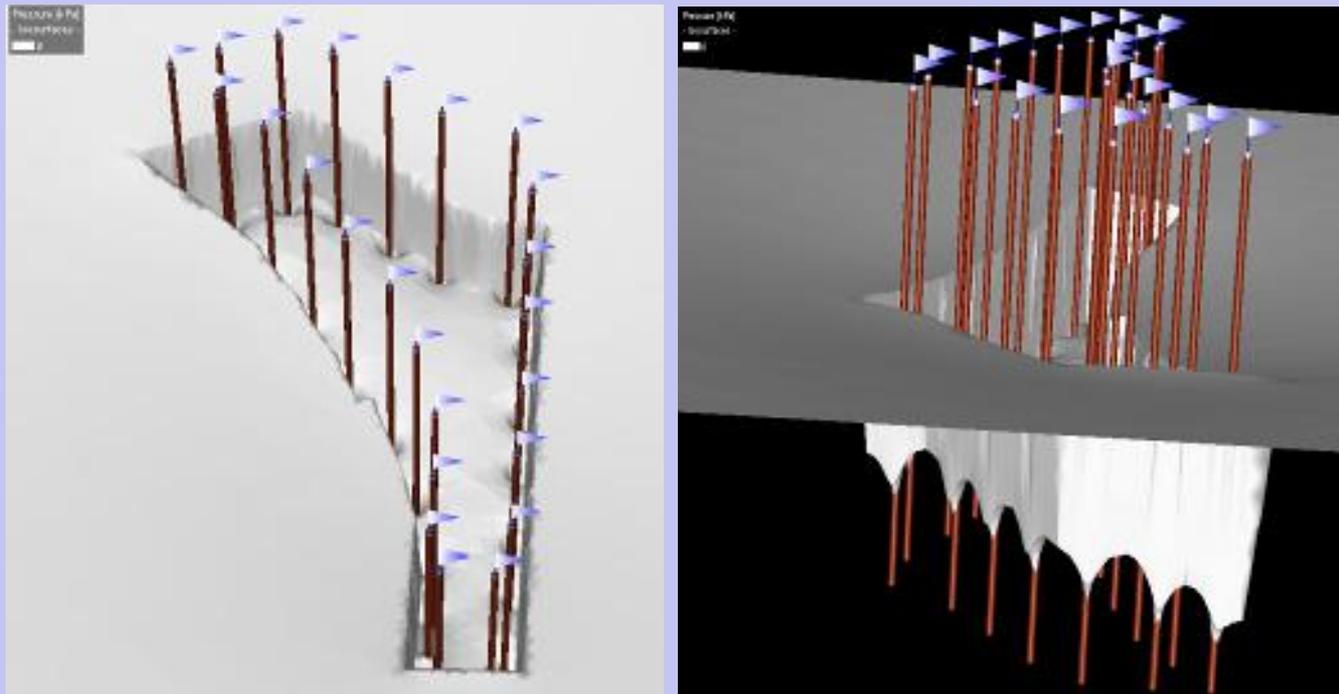


Figura 5.20 – Isoplano de presión de valor 0 generado por la acción de los 24 pozos. Izda. Vista superior de la parcela. Dcha. Vista inferior mostrando interacción entre pozos.

Aportaciones del TFM Análisis de un caso real

Modelo numerico

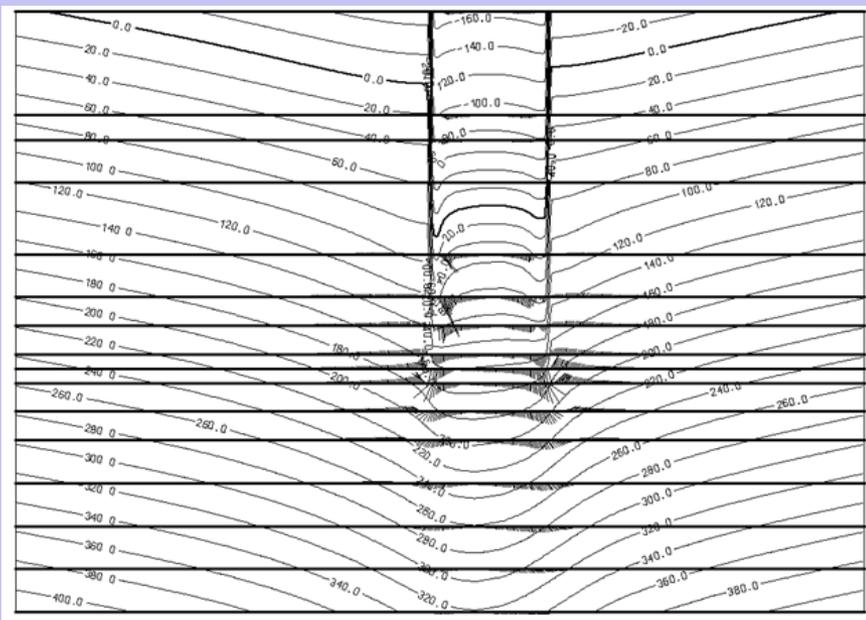


Figura 5.21– Distribución en sección vertical de isopiezas en kPa.

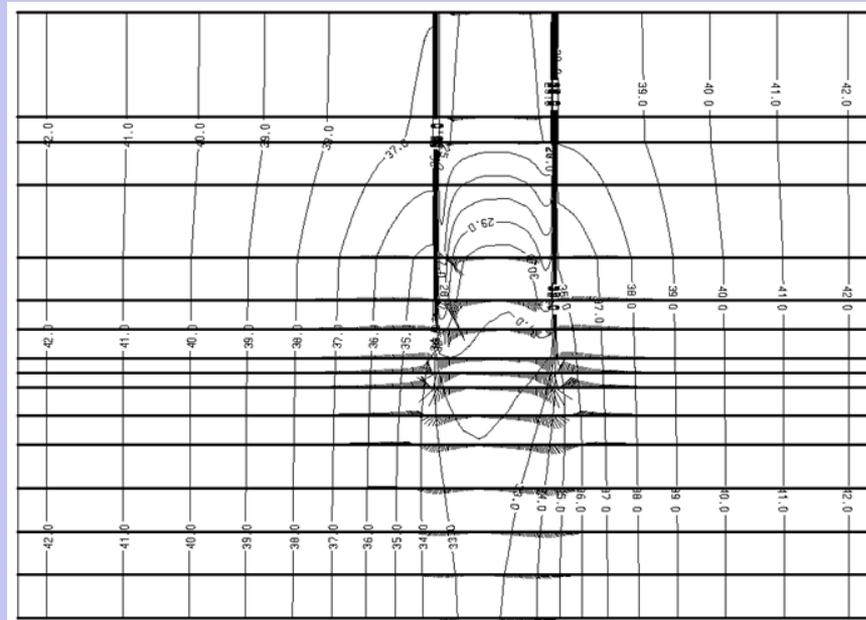


Figura 5.22– Distribución en sección vertical de líneas equipotenciales en metros de elevación sobre la base de referencia del modelo.

Aportaciones del TFM *Analisis de un caso real*

Modelo numerico

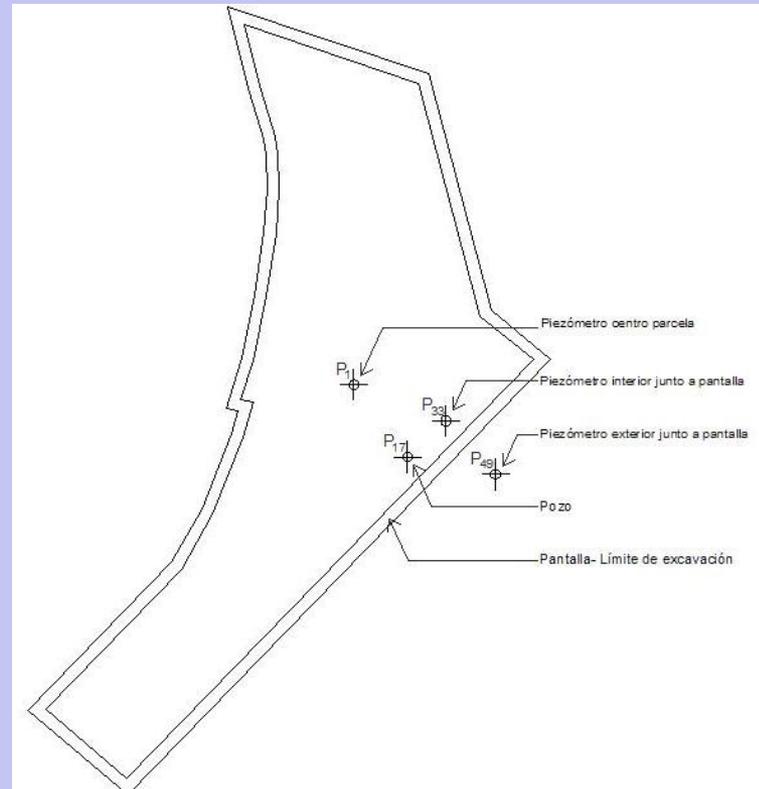


Figura 5.23– Posición de los piezómetros P_1 , P_{33} , P_{49} y pozo de bombeo P_{17} .

Aportaciones del TFM Análisis de un caso real



La Tabla 5.4 muestra los valores de las alturas hidráulicas calculadas por el modelo en cada uno de los nodos de la vertical de posicionamiento del pozo y de los piezómetros señalados en la Figura 5,24.

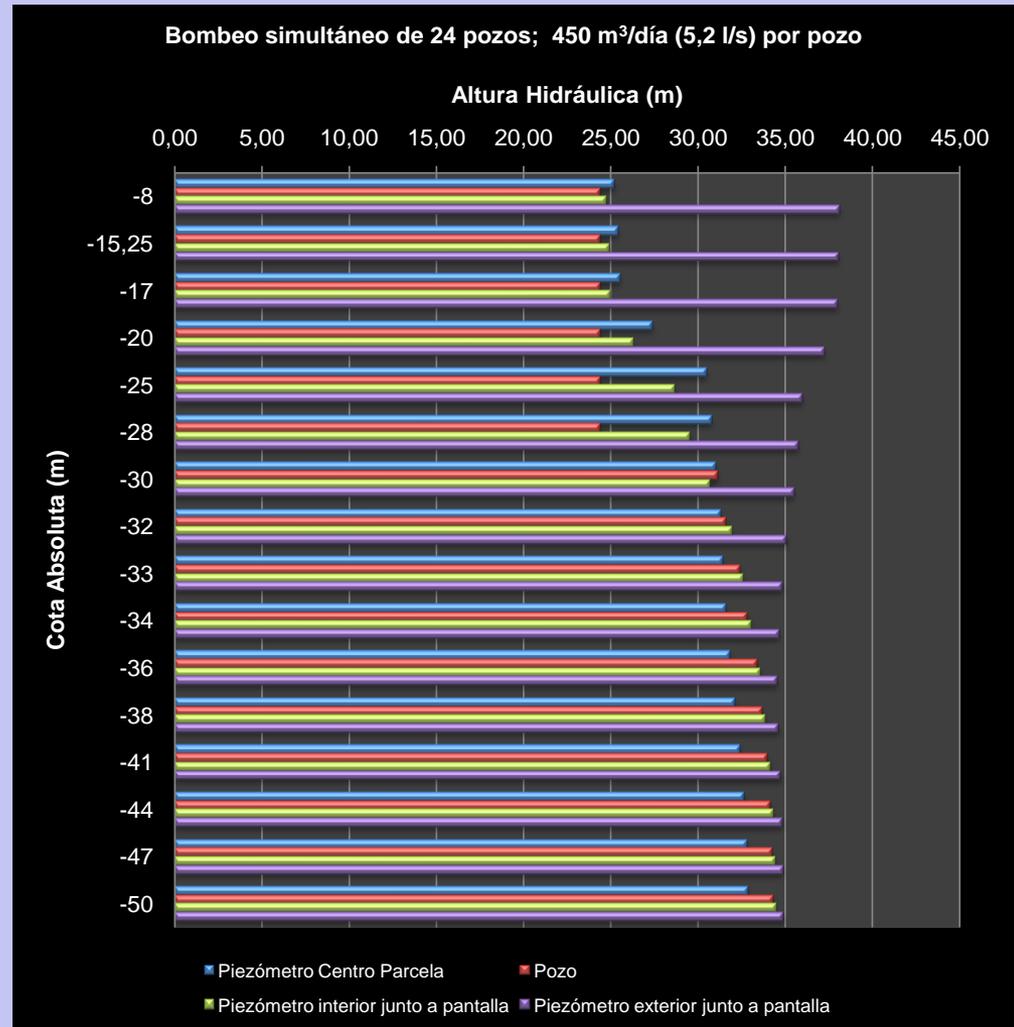
Cota absoluta (m)	Cota elevación del modelo (m)	Lámina (S)	Altura Hidráulica (m)			
			Piezómetro centro parcela P ₁	Pozo P ₁₇	Piezómetro interior junto a pantalla P ₃₃	Piezómetro exterior junto a pantalla P ₄₉
-8	42	1	25,22	24,38	24,75	38,11
-15,25	34,75	2	25,43	24,38	24,88	38,03
-17	33	3	25,54	24,38	24,96	37,99
-20	30	4	27,38	24,38	26,27	37,24
-25	25	5	30,48	24,38	28,68	35,96
-28	22	6	30,79	24,38	29,53	35,76
-30	20	7	31,03	31,13	30,70	35,50
-32	18	8	31,30	31,61	31,96	35,08
-33	17	9	31,44	32,41	32,56	34,84
-34	16	10	31,57	32,84	33,03	34,65
-36	14	11	31,84	33,38	33,56	34,56
-38	12	12	32,09	33,68	33,86	34,62
-41	9	13	32,42	33,97	34,16	34,73
-44	6	14	32,66	34,16	34,34	34,83
-47	3	15	32,80	34,26	34,43	34,89
-50	0	16	32,85	34,29	34,47	34,90

Tabla 5.4 – Alturas hidráulicas calculadas en nodos de cada capa de los piezómetros P₁, P₃₃, P₄₉ y pozo de bombeo P₁₇ con indicación de su cota de posición.

Modelo numerico

Modelo numerico

Figura 5.24 – Gráfico comparativo de las **Alturas hidráulicas** calculadas en nodos de cada capa de los piezómetros P₁, P₃₃, P₄₉ y pozo de bombeo P₁₇ con indicación de su cota absoluta.



Aportaciones del TFM Análisis de un caso real



Modelo numerico

Cota Absoluta	Cota elevación del modelo	Nº lámina (Slice)	Tensión total		Tensión efectiva σ' (kN/m ²) o (kPa)
			vertical σ_v (kN/m ²) o (KPa)	Presión u (kPa)	
-25	25	5	140,77	53,75	87,02
-28	22	6	202,58	86,18	116,4
-30	20	7	243,78	108,21	135,57
-32	18	8	284,98	130,45	154,53
-33	17	9	305,58	141,61	163,97
-34	16	10	326,18	152,77	173,41
-36	14	11	367,38	175,04	192,34
-38	12	12	408,59	197,13	211,46
-41	9	13	470,39	229,72	240,67
-44	6	14	532,19	261,49	270,70
-47	3	15	594,00	292,34	301,66
-50	0	16	655,80	322,25	333,55

Tabla 5.8 – Tensión efectiva σ' en cada nodo del piezómetro P₁ bajo de la máxima excavación y hasta la base de modelo numérico.

Modelo numerico

Comparativa de distintos escenarios

(Valores en P1)

ESCENARIO 1

(Bombeos en exterior, mismo caudal)

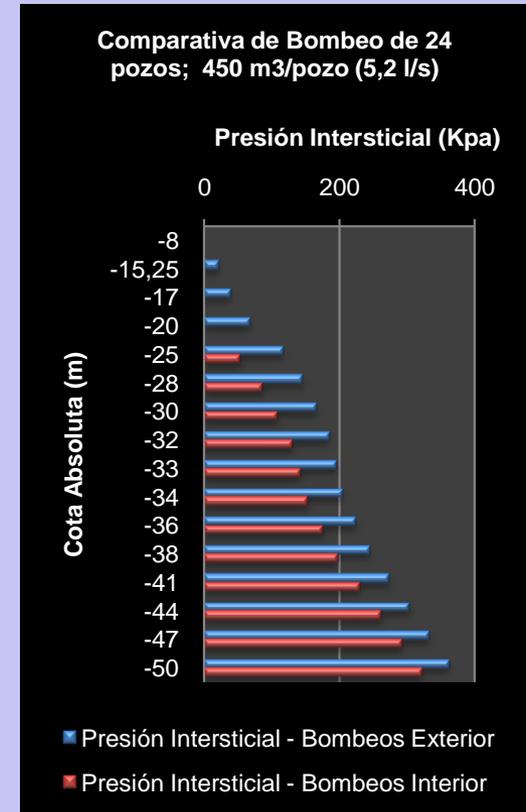
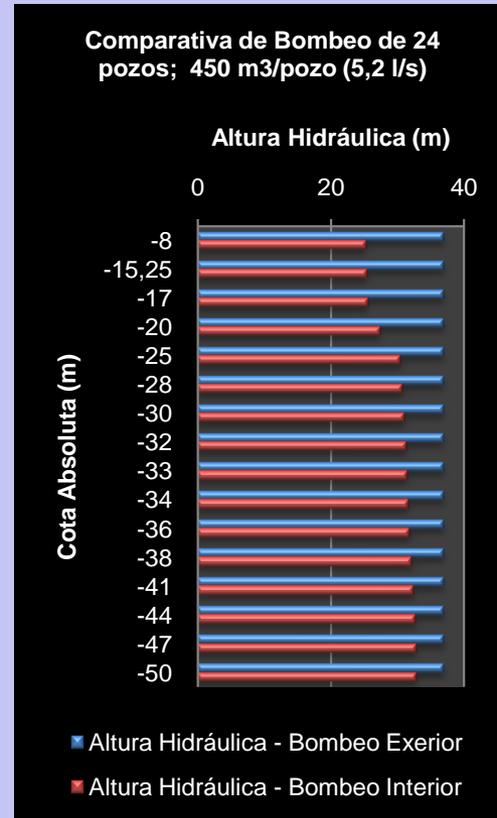


Figura 5.27– Grafico comparativo de altura hidráulica y presión intersticial en P₁ de escenario 1 y caso real.

Aportaciones del TFM Análisis de un caso real



Modelo numerico

Cota absoluta	Cota elevación del modelo	Nº lámina (Slice)	Tensión total vertical σ_v (kN/m ²) o (kPa)	Presión u (kPa)	Tensión efectiva σ' (kN/m ²) o (kPa)
-15,25	34,75	2	0,00	21,82	-21,82
-17	33	3	37,73	38,96	-1,23
-20	30	4	96,53	68,11	28,42
-25	25	5	194,53	116,68	77,85
-28	22	6	256,27	146,09	110,18
-30	20	7	297,43	165,71	131,72
-32	18	8	338,59	185,36	153,23
-33	17	9	359,17	195,18	163,99
-34	16	10	379,75	205,02	174,73
-36	14	11	420,91	224,69	196,22
-38	12	12	462,07	244,38	217,69
-41	9	13	523,81	273,92	249,89
-44	6	14	585,55	303,45	282,1
-47	3	15	647,29	332,96	314,33
-50	0	16	709,03	362,42	346,61

Comparativa de distintos escenarios

(Valores en P1)

ESCENARIO 1

(Bombeos en exterior, mismo caudal)

**INESTABILIDAD DE FONDO
EXCAVACION**

Tabla 5.11 – Valores de tensión efectiva, vertical total y presión intersticial calculados en los nodos del piezómetro P₁ en el estrato subyacente a la excavación para escenario 1.

Modelo numerico

Comparativa de distintos escenarios

(Valores en P1)

ESCENARIO 2

(Bombes en interior, mismo caudal),
reduciendo 1 m la longitud de las
pantallas)

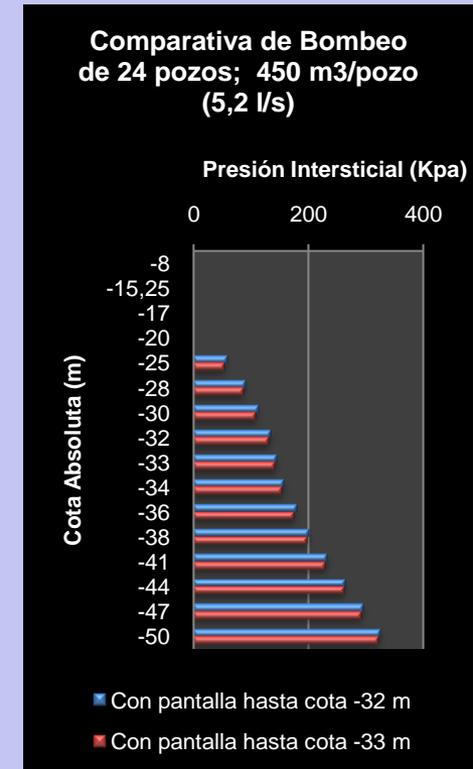
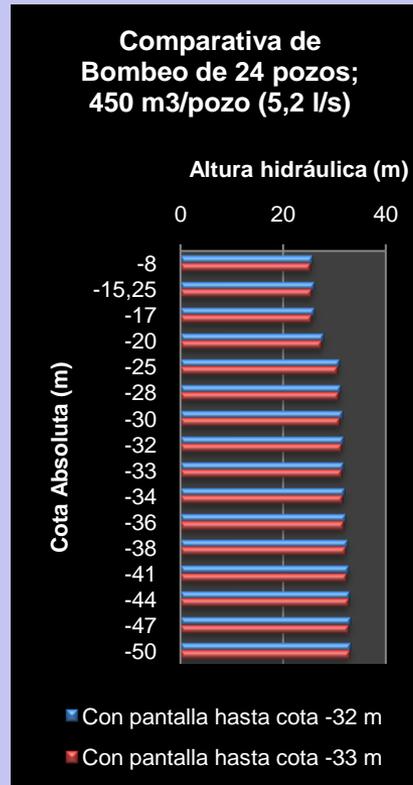


Figura 5.30– Grafio comparativo de altura hidráulica y presión intersticial en P₁ de escenario 2 y caso real.

Aportaciones del TFM Análisis de un caso real

Modelo numerico

Comparativa de distintos escenarios

(Valores en P1)

ESCENARIO 3

(Bombeos en interior, caudal 5,7 l/s),
reduciendo 3 m la longitud de las
pantallas)

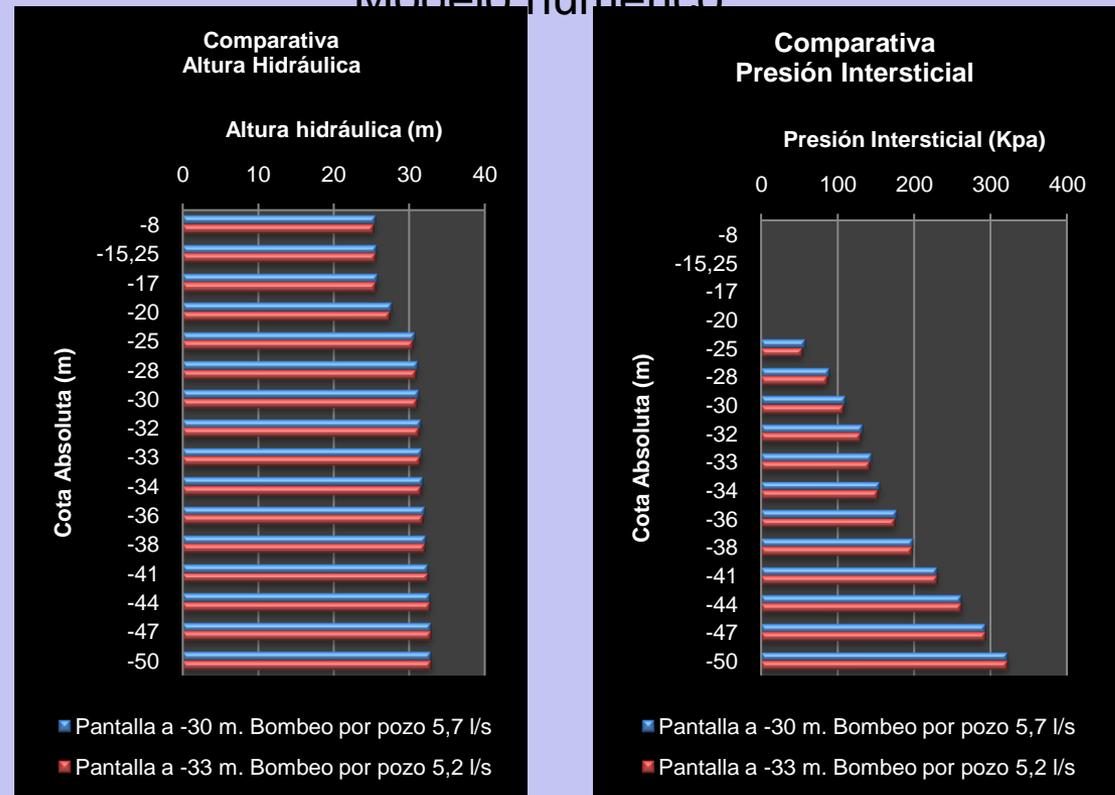


Figura 5.33– Grafio comparativo de altura hidráulica y presión intersticial en P₁ de escenario 3 y caso real.





Conclusiones

*Plantear un sistema de control de nivel de nivel freático para ejecutar una excavación afectada por el agua subterránea, requiere de una **caracterización hidrogeológica adecuada** y de una evaluación de los bombeos y pantallas, en su caso.*

- Una caracterización hidrogeológica con **rigor** debiera contar con **ensayos de bombeo**. Dado que en raras ocasiones se dispone de esta prueba, se han presentado **alternativas** que puedan orientar valores estimados de conductividad hidráulica, a partir de las curvas granulométricas (Prugg, Kozeny, Breyev o Hazen).
- En ocasiones se dispone de **ensayos de permeabilidad, tipo Lefranc**, que no suelen ser concluyentes, con resultados de gran variabilidad y en general resultando valores inferiores, incluso en ordenes de magnitud, con respecto a los reales.
- El **conocimiento de la hidrogeología global** de la zona de actuación puede alertar de posibles riesgos que deben ser analizados, tales como surgencias provocadas por **acuíferos confinados subyacentes** a las cotas de excavación (diapositivas 21) u otros efectos no previsibles, como filtraciones laterales (diapositiva 22).

Plantear un sistema de control de nivel de nivel freático para ejecutar una excavación afectada por el agua subterránea, requiere de una caracterización hidrogeológica adecuada y de una **evaluación de los bombeos y pantallas**, en su caso.

- Los modelos analíticos son más limitados pero más simples. Son adecuados para una primera estimación y casos sencillos.
- Un modelo numérico permite análisis de gran número de escenarios y alternativas, lo que posibilita adoptar una solución más eficiente en cuanto a posición de pozos, profundidad de barreras impermeables.
- Los modelos numéricos se presentan como el único medio de evaluación de una red de bombeo en un sistema complejo, en medios heterogeneos y anisotropos.
- Minimizar los caudales, reduce el impacto en el medio ambiente, reduce costes energéticos y mejora la sostenibilidad. Además, reducirá los costes de canon por vertido, en su caso.
- Es práctica habitual sobredimensionar los equipos e instalaciones, por falta de entendimiento y precisión de las estimaciones, lo que redundará en costes desproporcionados.

En resumen, **la modelación numérica se muestra como una herramienta adecuada** para la solución de los problemas de propuesta de una **red de control del nivel piezométrico** basada en el bombeo de pozos. En esta presentación se muestra lo anterior con la aplicación a un caso real de elevada complejidad, analizando la sensibilidad del modelo ante distintos escenarios.

GRACIAS POR SU ATENCION ***(Vídeo)***

Revisión conceptos. Aplicación práctica

- **Densidad relativa** – densidad natural de una muestra frente al valor máximo que pudiera alcanzar.

Clasificación de suelos mediante ensayos SPT

Suelos Granulares		<i>Suelos Cohesivos</i>	
0-10	<i>Suelto</i>	0-4	<i>Blando</i>
10-30	<i>Densidad Media</i>	4-8	<i>Dureza Media</i>
30-50	<i>Denso</i>	8-15	<i>Duro</i>
>50	<i>Muy Denso</i>	15-30	<i>Muy Duro</i>

Masa de golpeo 63,5 Kg; Altura de caída libre 760 mm

Tabla 2.1: Número de golpes por pie de avance.

Suelos bien graduados ($C_u > 30$), mayor densidad. Suelos angulares, mayor densidad que redondeados
 A mayor densidad relativa, disminuye la compresibilidad y la conductividad hidráulica

- **Peso específico seco** (γ_{Dry}) – Peso de muestra seca de volumen conocido. Granulares naturales desde 14,1 kN/m³ (arenas naturales sueltas) a 20,4 kN/m³ (bloques de muestra densa)

- **Peso específico saturado** (γ_{sat}) – Peso de muestra seca, mas el peso del agua contenida en sus poros.

$$\gamma_{sat} = \gamma_D + \gamma_w n$$

- **Peso específico sumergido** (γ_{subm}) – En ausencia de drenaje, se deduce el efecto de la flotabilidad

$$\gamma_{subm} = \gamma_D - (1 - n)\gamma_w$$

- **Peso específico natural** (γ_{subm}) – En suelos impermeables (particularmente arcillas) una aproximación razonable sería

$$\gamma_{subm} = \gamma_{nat} - \gamma_w$$

- Conceptos importantes ante problemas característicos de drenajes, tales como **asentamientos, roturas de fondo o fluidificación del suelo.**

- Potencial de un fluido (energía contenida) y altura hidráulica h

$$\Phi = gh$$

$$h = z + \frac{p}{\rho g} = z + \psi$$

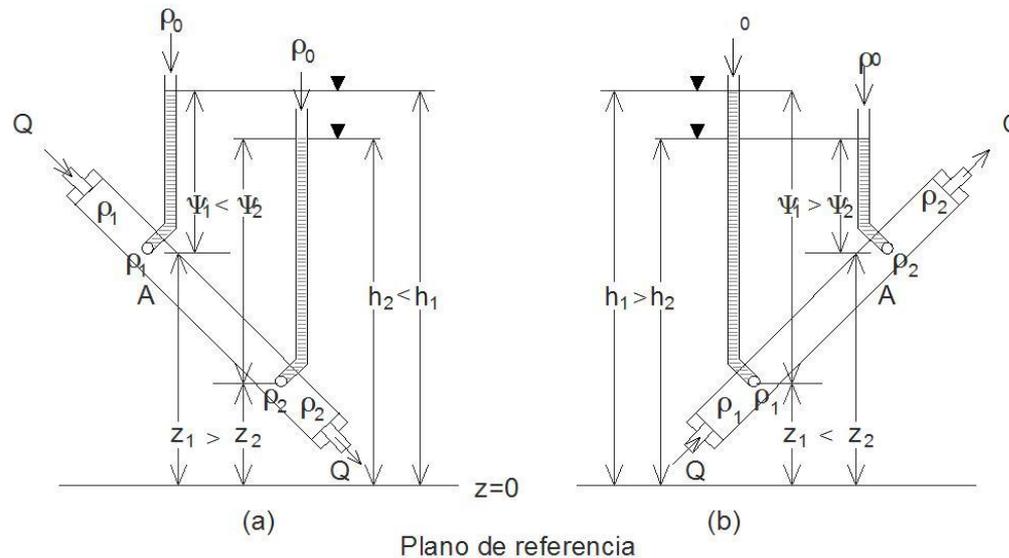


Figura 2.1.- Control de dirección del flujo (József Tóth, 2009).

- Tensión efectiva. Postulado de Terzaghi $\sigma_1' = \sigma_1 - u$

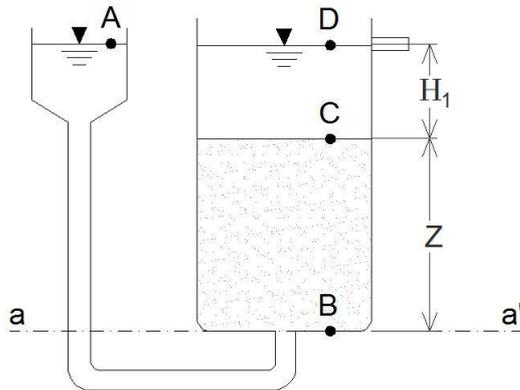


Figura 2.2.- Depósito conectado a reservorio en equilibrio. No existe flujo.

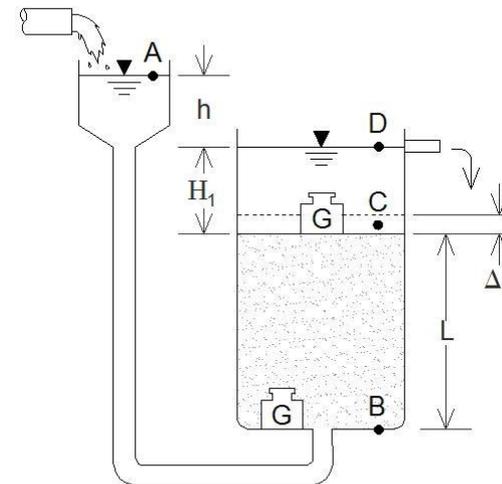


Figura 2.3.- Depósito conectado a reservorio a mayor cota Flujo ascendente en el medio poroso.

•Asientos y subsidencias

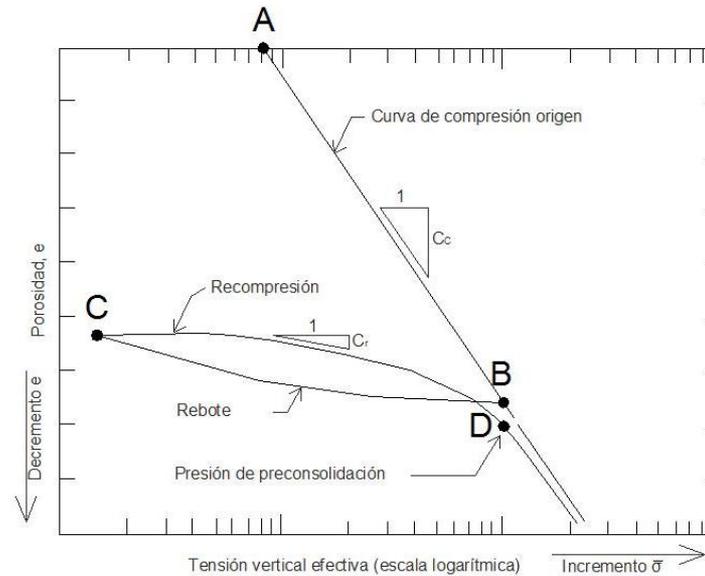


Figura 2.6.- Presión versus índice de poros, para arcillas compresible (J. Patrick Power, 1992).

•Indice de poros

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

relación con la porosidad

$$n = \frac{e}{1+e}$$

•Drenaje suelo granular bajo muro estrato compresible

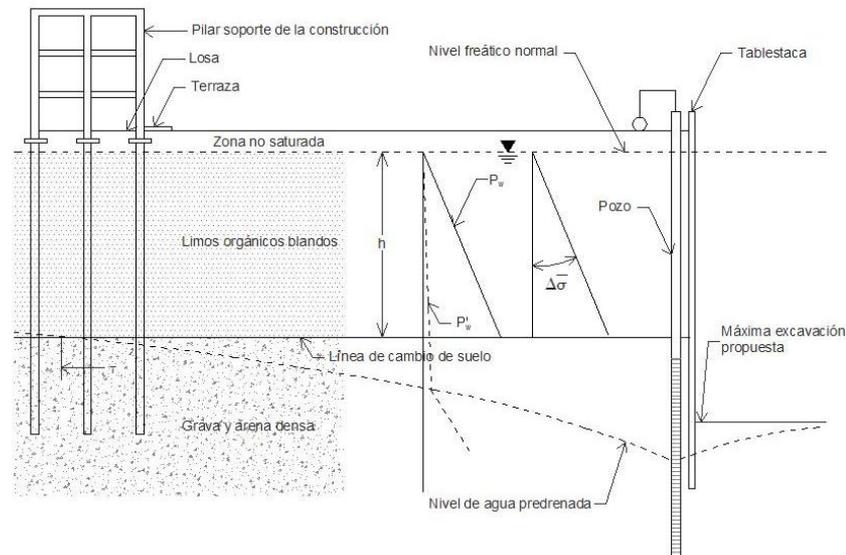


Figura 2.7.- Drenaje bajo muro de estrato compresible (J. Patrick Power, 1992).

- Drenaje suelo granular sobre techo de estrato compresible

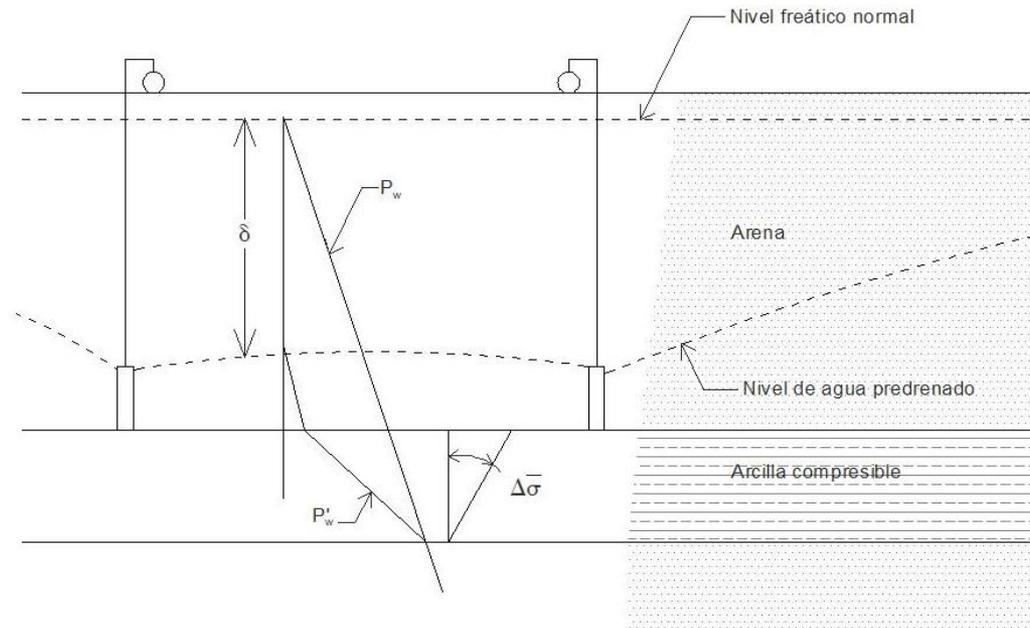


Figura 2.8.- Drenaje sobre techo de estrato compresible (J. Patrick Power, 1992).

- Reducción de las presiones intersticiales por sobreexplotación de acuífero (México DF)

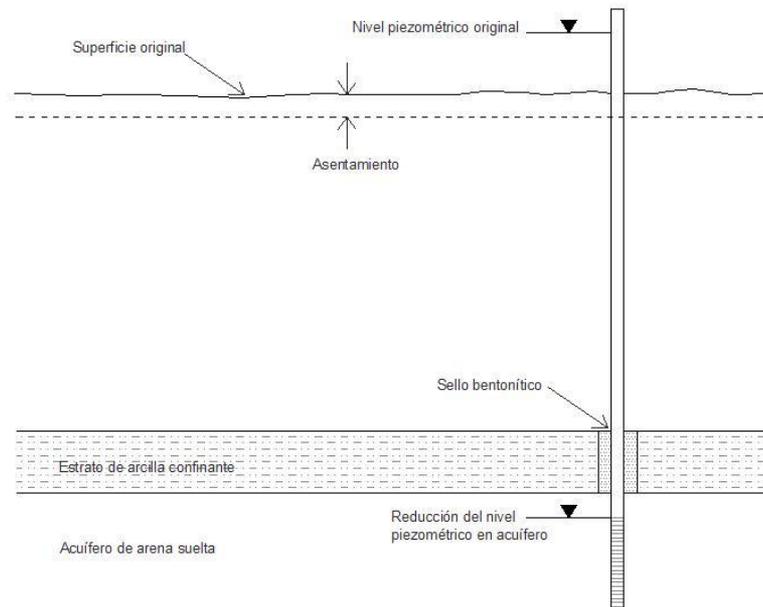


Figura 2.9.- Asentamiento por bombeo de acuífero confinado (J. Patrick Power, 1992)

Síntesis de métodos utilizados en el control del nivel freático

•Bombeos abiertos superficiales / Zanjas

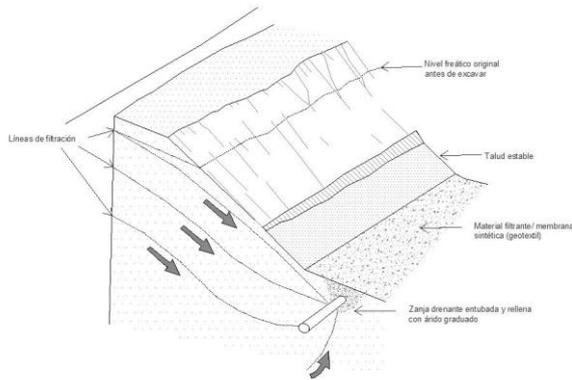


Figura 3.2.- Esquema general de zanja de intercepción y distribución de flujo, con tubo y prefiltro de árido graduado (CIRIA R113, 1986).

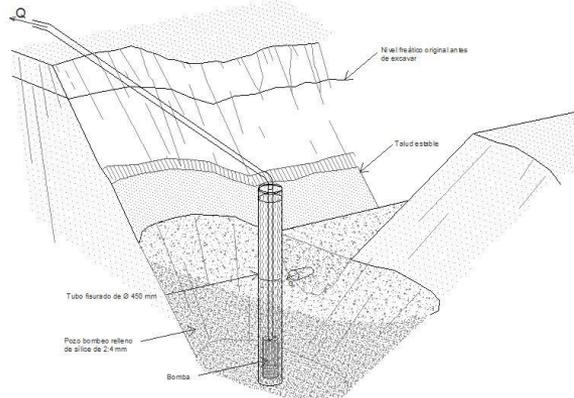


Figura 3.5.- Esquema constructivo genérico de recinto de sumidero.



Figura 3.3.- Imagen de sumidero (*sump*) completamente equipado, previo a la ejecución de la excavación (cortesía de FERRER, S.L.).

•Bombes asistidos por vacío - wellpoint

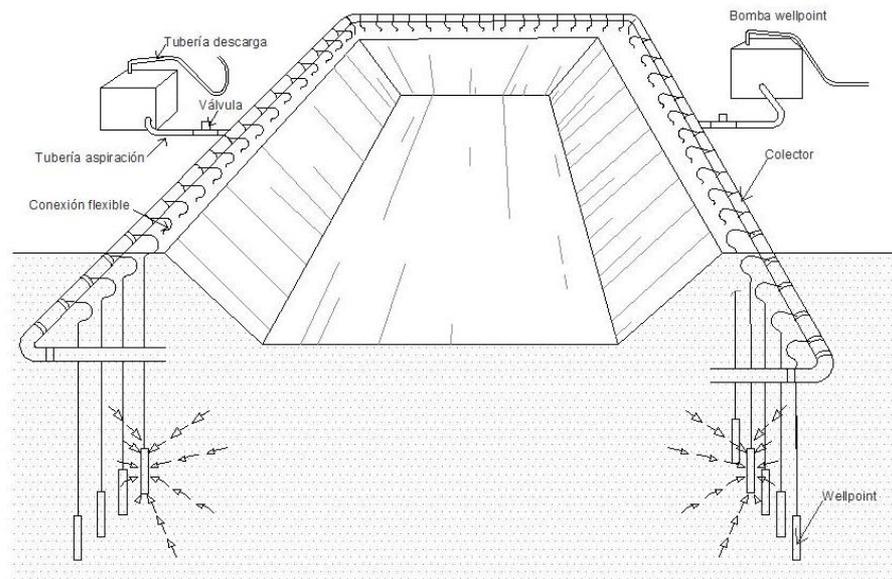


Figura 3.11.- Esquema de implante de un sistema de bombeo wellpoint en un área extendida.

• **Bombes asistidos por vacío - wellpoint**



Figura 3.12.- Instalación de sistema wellpoint. Izda. Nivel freático inicial, previo al inicio del bombeo. Dcha. Nivel freático deprimido por la acción del bombeo (Málaga, 2006 - Cortesía de FERRER, S.L.).

• **Bombeos asistidos por vacío - wellpoint**



Figura 3.14.- Montaje de un filtro wellpoint. Izda. Asta helicoidal perforando con cabezal hidráulico.
Dcha. Detalle del asta con extracción de lodo arcilloso.
(Cortesía de FERRER, S.L.).

•Bombes asistidos por vacío - wellpoint

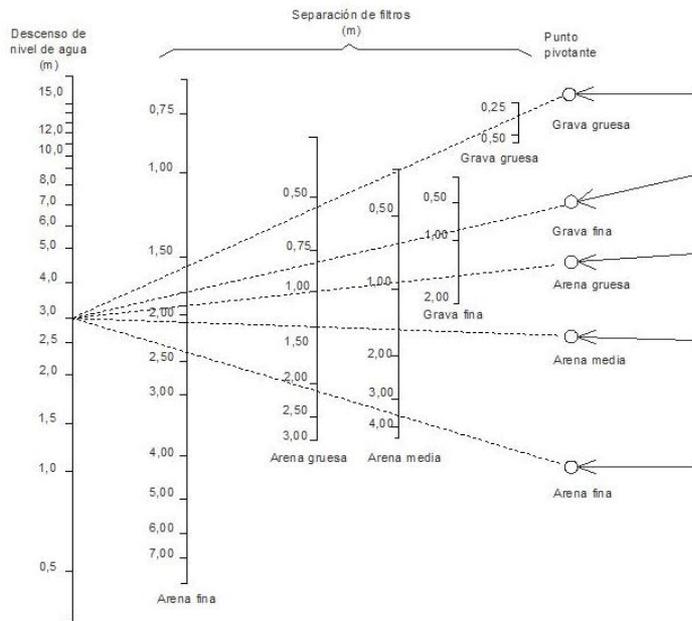


Figura 3.15.- Espaciado de wellpoints (m), para arenas y gravas limpias y uniformes (CIRIA R113, 1986).

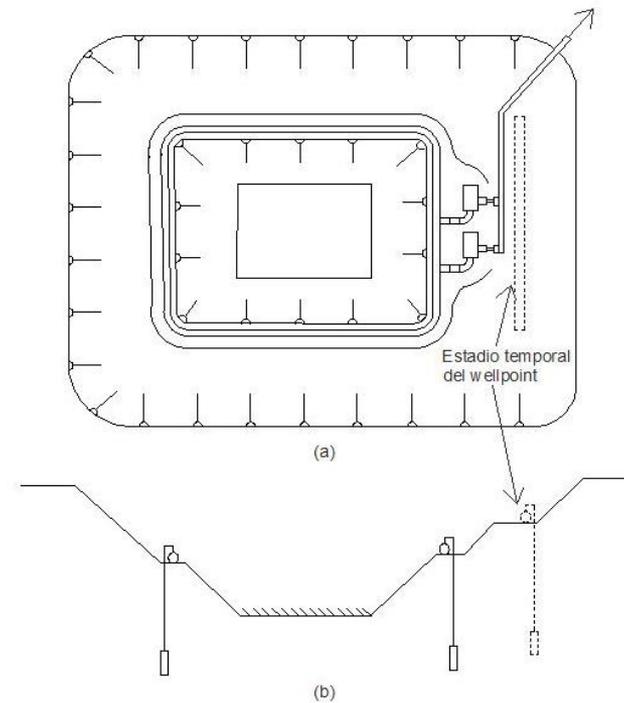


Figura 3.16.- Multiestadio temporal de anillos de wellpoint (CONST. DEWATERING & GROUNDWATER CONTROL, 2007).

•Sistemas de bombeo con pozos profundos

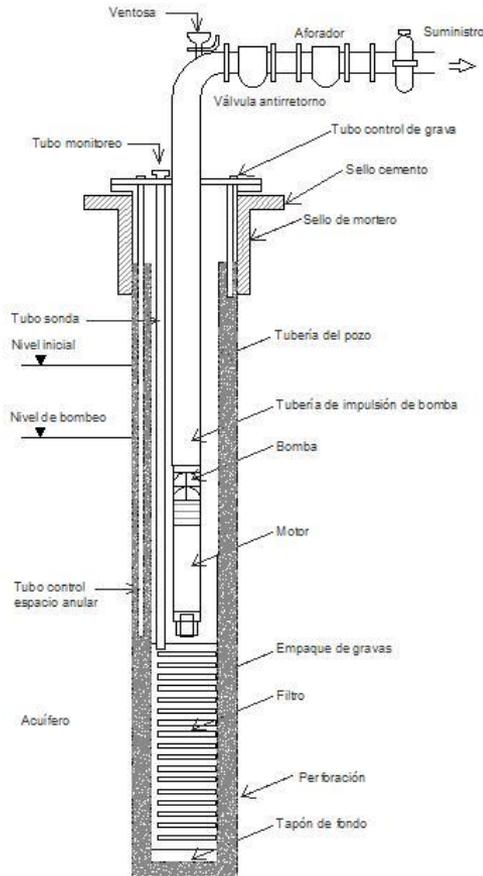


Figura 3.18.- Esquema general de un pozo equipado con electrobomba sumergible

Caudal máximo de bombas sumergibles (l/s)	Diámetro mínimo recomendado de tubería filtro (mm)	Diámetro mínimo recomendado de perforación (mm)
5	125-152	250-275
10	152-203	300-325
15	165-250	300-375
20	180-250	300-375
25	203-300	325-425
44	250-350	375-475

Tabla 3.1.- Recomendaciones de diámetro de tubería filtro y tubería ciega en función del equipo para bombear un caudal determinado (P.M. Cashman et al., 2001).

Rango de C_u	Tamaño con respecto a D_{50} de la muestra
Suelos de $C_u < 3$	D_{50} filtro en rango de 4 a 5 veces D_{50} suelo
Suelos de C_u entre 4 y 6	D_{50} filtro en rango de 4 a 6 veces D_{50} suelo
Suelos de $C_u > 7$	D_{50} filtro en rango de 8 veces D_{50} suelo

Tabla 3.2.- Determinación de la graduación del árido del empaque de prefiltro. (J. Patrick Powers et al., 2007).

• **Metodos constructivos de pozos profundos (Inyección – Balde)**

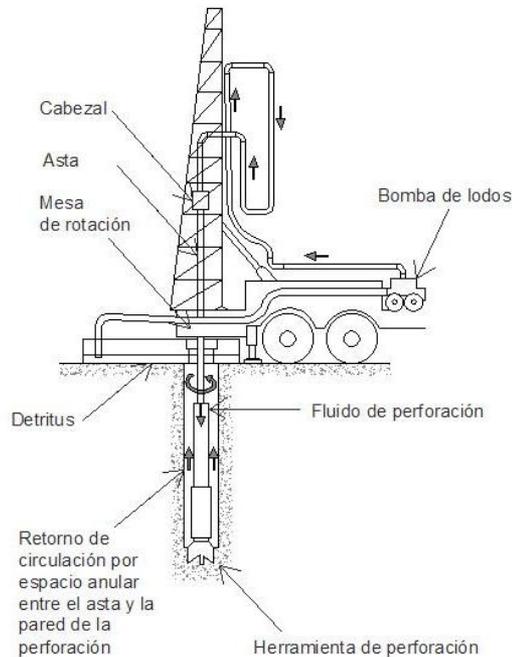


Figura 3.20.- Perforación con balde. (Powers et al. 2007).

Figura 3.19.- Imagen de colocación de tubería para pozo de bombeo por inyección con tubería auxiliar interior (Cortesía de MORETRENCH).

•Metodos constructivos de pozos profundos (Circulación Directa e Inversa)

Rotación con lodos - circulación directa



Rotación con lodos - circulación inversa

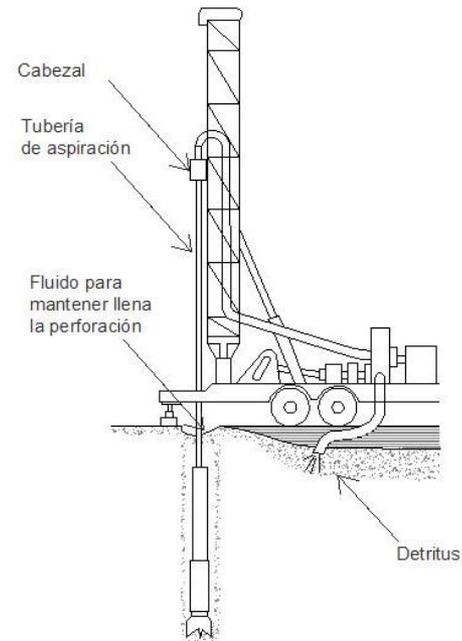


Figura 3.21.- Esquemas de perforación a rotación.
Circulación convencional o directa (Izda.). Circulación inversa (Dcha).

- Métodos constructivos de pozos profundos (Sistema OD o Dual), el de mayor eficiencia para pozos destinados a control de nivel freático.



Figura 3.23.- Izda Máquina perforadora sistema OD. Drcha. Cabezal OD de acción dual (Cortesía de FERRER, S.L.).

- Métodos constructivos de pozos profundos (Sistema OD o Dual), el de mayor eficiencia para pozos destinados a control de nivel freático.



Figura 3.24.- Red de control con pozos de baja capacidad—Universidad Politécnica de Valencia—
(Cortesía de FERRER, S.L.).

• **Metodos constructivos de pozos profundos (Inyección – Balde)**

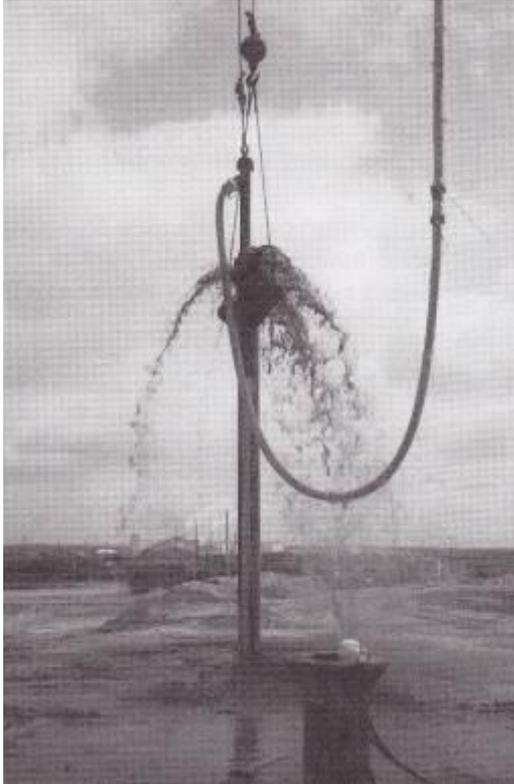


Figura 3.20.- Perforación con balde. (Powers et al. 2007).

Figura 3.19.- Imagen de colocación de tubería para pozo de bombeo por inyección con tubería auxiliar interior (Cortesía de MORETRENCH).

• **Metodos constructivos de pozos profundos (Sónica – Percusión a cable)**

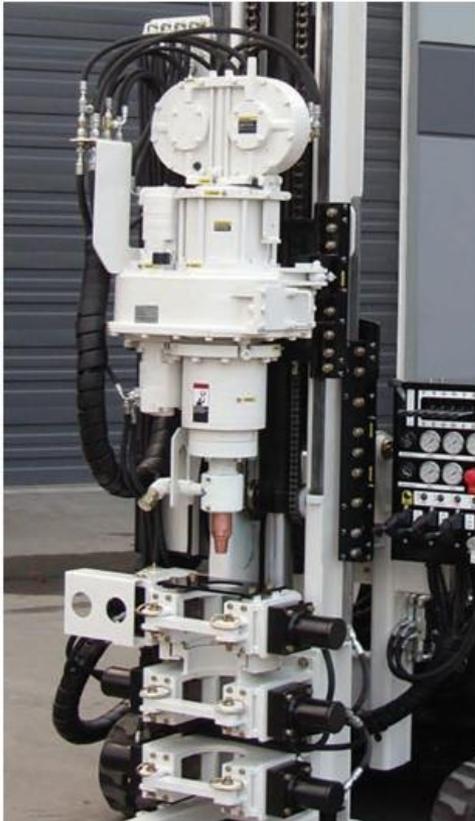
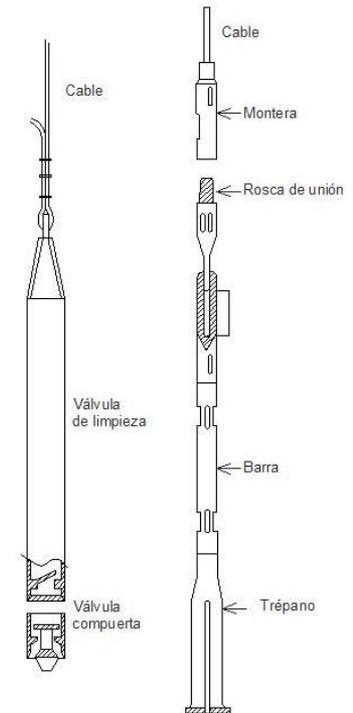


Figura 3.26.- Cabezal para perforación sónica
(Cortesía de SONIC DRILL CORPORATION)



Figura 3.27.- Izda. Máquina de perforación a percusión por cable. Dcha. Esquema de válvula de limpieza y de trépano (Cortesía de FERRER, S.L.).



Modelación matemática en hidrogeología aplicada.

• Conductividad hidráulica equivalente

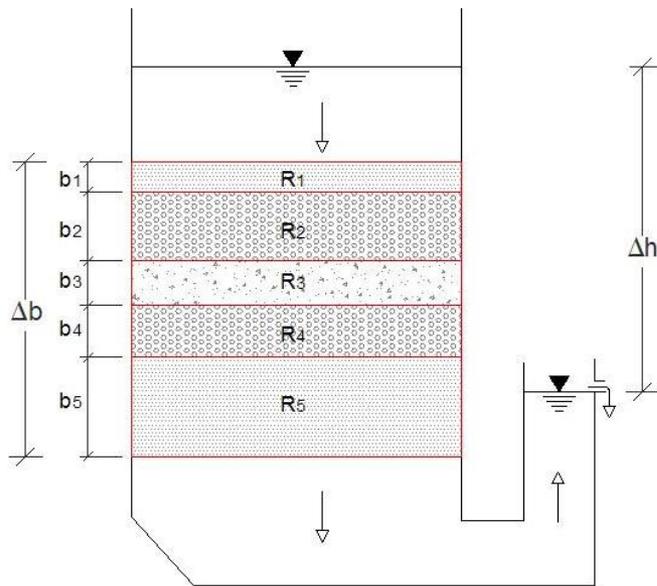


Figura 4.1.- Flujo en sentido perpendicular a los estratos de un suelo (E. Custodio y M.R. Llamas, 2001).

$$\frac{1}{k_v} = \frac{1}{L} \sum \frac{b_i}{k_i}$$

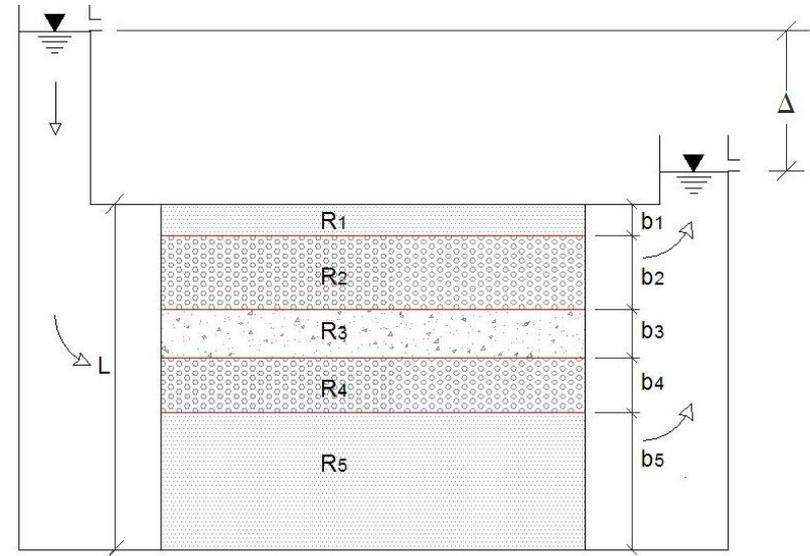


Figura 4.2.- Flujo en sentido paralelo a los estratos de un suelo (E. Custodio y M.R. Llamas 2001).

$$k_h = \frac{1}{L} \sum b_i k_i$$

• **Coefficiente de almacenamiento.**

Suelo	Coefficiente de Almacenamiento específico
Arcilla	1% - 10%
Arena	10% - 30%
Grava	15% - 30%
Arena y Grava	15% - 25%
Arenisca	5% - 15%
Pizarra	0,5% - 5%
Caliza	0,5% - 5%

Tabla 4.2: Valores orientativos del coeficiente de almacenamiento (Sterrett, R., 2007)

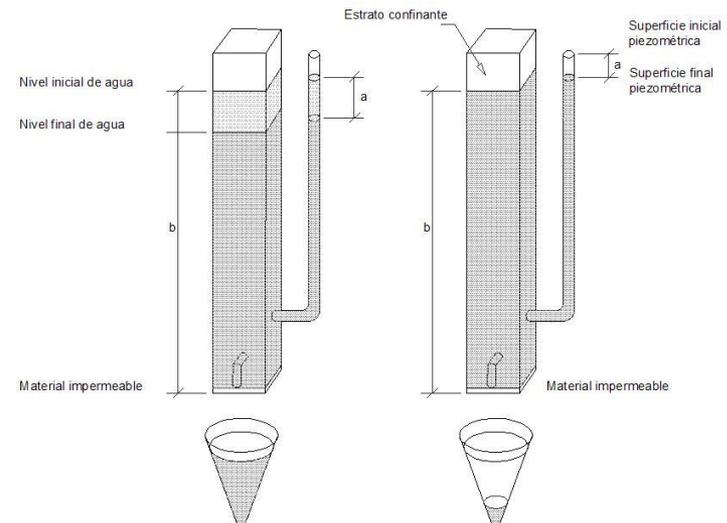


Figura 4.3.- Agua liberada del almacenamiento para un descenso de potencial hidráulico “a”.
Izda, En acuífero libre. Dcha. En acuífero confinado.
(Sterrett, R., 2007).

•Radio de Influencia.

Tipo de material permeable	Forma de funcionamiento del acuífero	Valores posibles de radios de influencia
KARSTICO	LIBRE	700 m – 1.000 m
	SEMICONFINADO	1.000 m – 1.500 m
	CONFINADO	1.500 m – 2.000 m
POROSO INTERGRANULAR	LIBRE	400 m – 700 m
	SEMICONFINADO	700 m – 900 m
	CONFINADO	900 m – 1.200 m
KARSTICO Y POROS	LIBRE	500 m – 1.000 m

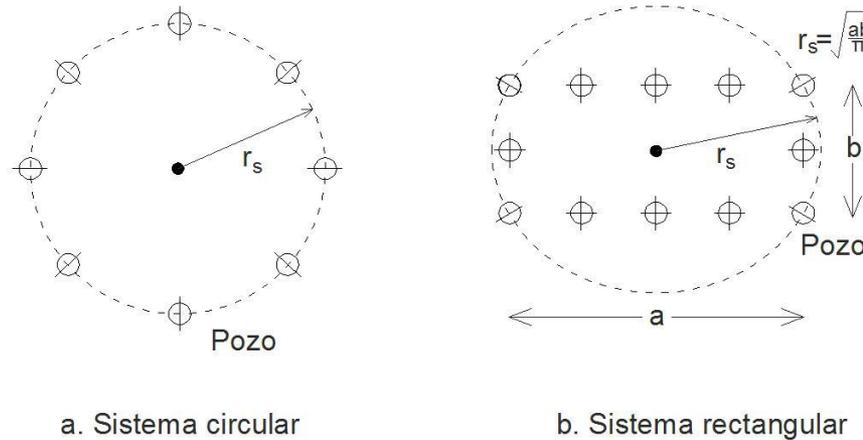
Tabla 4.3 – Estimación de Radios de Influencia (Villanueva, M. y Iglesias, A., 1984).

También se puede recurrir a expresiones empíricas, tales como la desarrollada por Sichart y Kryieleis

$$R_0 = 3000 (H - h)\sqrt{K}$$

donde R_0 es el radio de influencia en metros, H es el potencial hidráulico del acuífero previo al bombeo, h es el potencial hidráulico en el pozo de bombeo activo, ambos expresados en pies, y K es la conductividad hidráulica, expresada en metros por segundo

•Radio equivalente



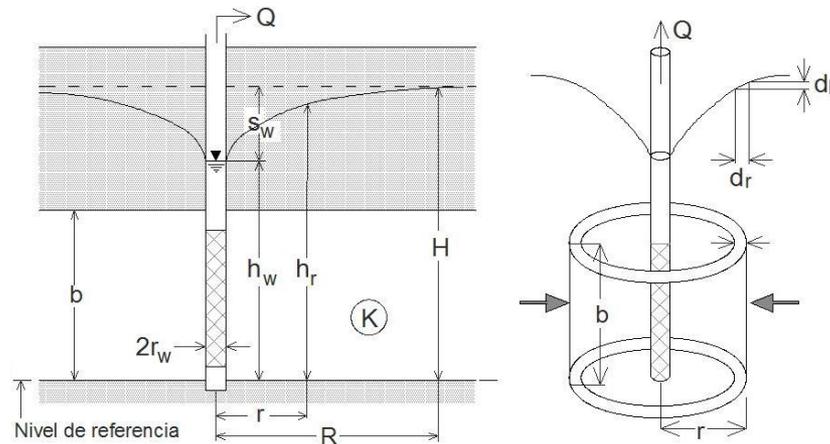
$$r_s = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$$

Figura 4.4. – Aproximación de radio equivalente (r_s).
a) Sistemas circulares: b) Sistemas rectangulares.
(J. Patrick Powers et al, 2007).

Algunos analistas, para la obtención del radio equivalente de un sistema rectangular, prefieren el uso de la expresión

$$r_s = \frac{a+b}{\pi}$$

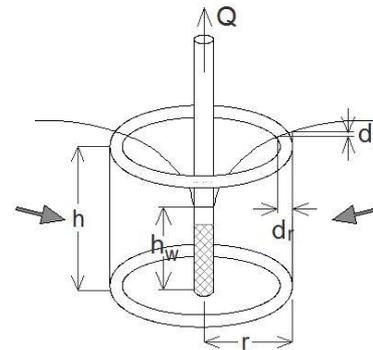
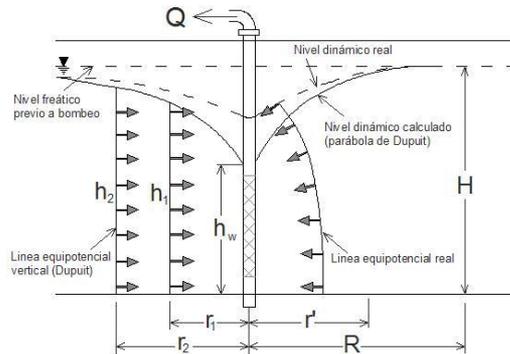
•Hidráulica de captaciones. Funciones básicas – Acuífero confinado (Thiem)



$$Q = \frac{2\pi T(H - h_w)}{\ln \frac{R}{r_w}}$$

Figura 4.6 – Izda. Elementos que intervienen en el flujo del agua subterránea hacia un pozo totalmente penetrante en acuífero confinado. Dcha. Esquema en derivadas para la solución de la ecuación diferencial de flujo a un pozo totalmente penetrante en acuífero confinado. (Kresic, N., 1997).

•Hidráulica de captaciones. Funciones básicas – Acuífero libre (Dupuit)



$$Q = \pi K \frac{(H^2 - h_w^2)}{\ln \frac{R}{r_w}}$$

Figura 4.7 – Izda. Elementos que intervienen en el flujo del agua subterránea hacia un pozo totalmente penetrante en acuífero libre. Dcha. Esquema en derivadas para la solución de la ecuación diferencial de flujo a un pozo totalmente penetrante en acuífero libre. (Kresic, N., 1997).

•Hidráulica de captaciones. Funciones básicas – Descensos acumulativos

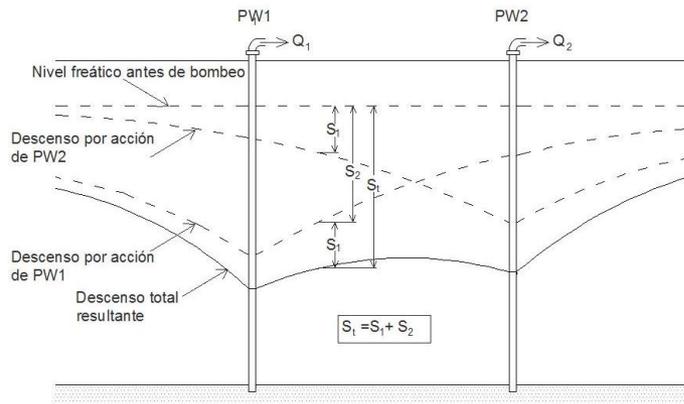


Figura 4.8 – Descenso total (S_t) acumulado por la suma algebraica de los descensos ($+S_1$ y $+S_2$) provocado por la acción de bombeo en cada uno de los pozos (Kresic, N., 1997)

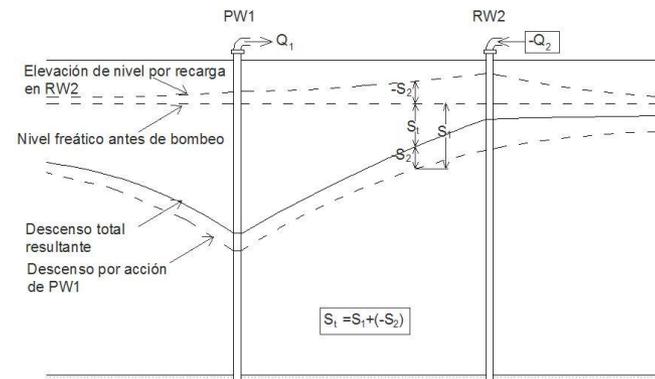


Figura 4.9 – Descenso total (S_t) acumulado por la suma algebraica del descenso ($+S_1$) provocado por el bombeo en el pozo 1 (PW1) y el ascenso ($-S_2$) provocado por la inyección en el pozo 2 (RW2). (Kresic, N., 1997)

•Hidráulica de captaciones. Funciones básicas – Teoría de las imágenes

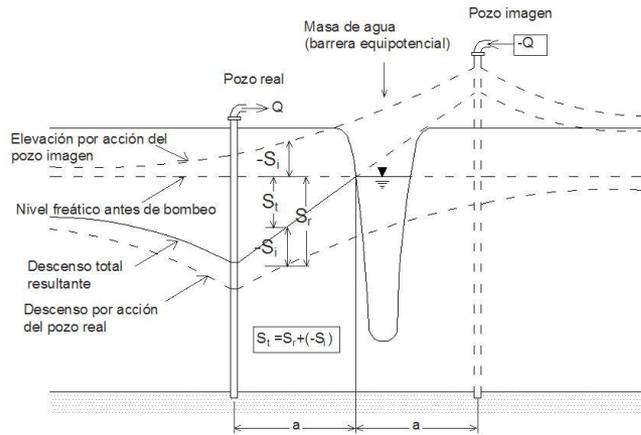


Figura 4.10 – Descenso total (S_t) acumulado por la suma algebraica del descenso ($+S_r$) provocado por el bombeo en el Pozo Real (Q) y el ascenso ($-S_i$) provocado por la inyección simulada en el Pozo Imagen ($-Q$). (Kresic, N., 1997)

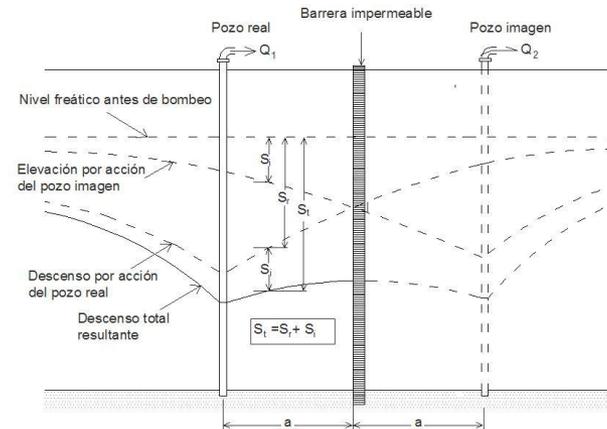


Figura 4.11 – Descenso total (S_t) acumulado por la suma algebraica del descenso ($+S_r$) provocado por el bombeo en el Pozo Real (Q_1) y el descenso ($+S_i$) provocado por la extracción simulada en el Pozo Imagen (Q_2). (Kresic, N., 1997)



Referencias

- Comisión Docente FCIHS (2009). *Hidrogeología*. Barcelona, España.
- Cashman, P.M., Preene, M. (2001). *Groundwater Lowering in Construction*. Spon Press, New York.
- *Dewatering and Groundwater Control* (2004). AFM 88-5 Chap. 6. UFC-Department of Defense. USA. 2004.
- Ferrer, A., Davila, V., Sahuquillo, A. (2008). *Descenso artificial del nivel freático en centros urbanos*. Congreso El agua y las infraestructuras en el medio subterráneo (Barcelona, 24-26 noviembre 2008)
- Ferrer, A. Alonso, C., Soria V. (2008) *Finite Element Simulation of Construction Site Dewatering*. International Conference on Engineering and Mathematics. (Bilbao, July 7-9, 2008).
- Fetter, C.W. (2001). *Applied Hydrogeology*, 4th Edition, Prentice Hall, NJ, USA.
- Gonzalez, L. (2006) *Ingeniería Geológica*: Pearson Prentice Hall, Madrid, España.
- Hajjar, D., AbouRizk, S., Xu, J.(1997). *Construction site dewatering análisis using a special purpose simulación-based Framework*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Canada.
- Hill, M.C. & Tiedeman C.R. (2007). *Effective Groundwater Model Calibration. With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty*. Wiley Interscience. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Howsam, P., Misstear, B., Jones, Ch. (1995) *Monitoring, maintenance and rehabilitation of water supply boreholes*. CIRIA R137. London
- Kresic, N. (1997). *Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling*. Lewis Publisher, CRC Press LLC. Boca Raton, Florida.
- Howsam, P., Misstear, B., Jones, Ch. (1995). *Monitoring, maintenance and rehabilitation of water supply boreholes*. CIRIA R137. London.
- Powers, J.P.; Corwin, A.B.; Schmall, P.C. and Kaeck (2007), *Construction Dewatering and Groundwater Control. New Methods and Applications*. 3rd Edition. John Wiley & Sons Inc. NY, USA.
- Preene, M.; Roberts, TOL.; Powrie, W. y Dyer MR. (2004). *Groundwater control – design and practice*. CIRIA C515. London.
- Preene, M. Brassington, R. *Potential Groundwater Impacts From Civil Engineering Works*. Water and Environmental Journal. March 2003 – Vol17-Issue 1
- Scott, E., Neumann, R. (2008), *Construction Dewatering and Ground Water Control: Desing and Application*. Course #351 National Ground Water Association (Milwaukee, Wisconsin).
- Somerville, S.H. (2005). *Control of groundwater for temporary works*. CIRIA C113. London.
- Sterrett, R (2007), *Groundwater and Wells*. (3rd ed.). Johnson Screens, New Brighton, MN.
- Tokgoz, M.; Yilmaz, K. and Yazicigil, H. (2002). *Optimal Aquifer Dewatering Schemes for Excavation of Collector Line*. Journal of Water Resources Planning and Management 128:4, 248.
- Tôth, J. (2009). *Gravitational Systems of groundwater flow..* (Cambridge, United Kingdom)
- Trefree, M.G. & Muffels C. (2007). *FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool*. Ground Water 45:5, 525-528.
- Villanueva, M. & Iglesias, A. (1984). *Pozos y Acuíferos: Técnicas de Evaluación Mediante Ensayos de Bombeo*. Publicación del IGME.
- WASY Software_GmbH Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlin.
<http://www.wasy.de/english/products/fefflow/index.html>.
- SPS (Special Purpose Simulation), desarrollado por Hajjar, D., AbouRizk, S., Xu, J.(1997). *Construction site dewatering análisis using a special purpose simulación-based Framework*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Canada
- Tokgoz, M.; Yilmaz, K. and Yazicigil, H. (2002). *Optimal Aquifer Dewatering Schemes for Excavation of Collector Line*. Journal of Water Resources Planning and Management 128:4, 248.



Deseo agradecer el apoyo de los profesores **Andrés Sahuquillo** y **Eduardo Cassiraga**, por el planteamiento del trabajo, por sus ideas e implicación personal, así como por el esfuerzo realizado en sus correcciones.

Al profesor **Vicente Soria**, iniciador de mi entusiasmo por la aproximación del conocimiento teórico al campo de aplicación, conciliando la experiencia que da la práctica y la teoría.

Al profesor **Jesús Carrera**, fuente de explicaciones y razonamientos que reforzaron mi entendimiento en áreas esenciales.

Al doctor **Reinhard Zapata**, quien desde su dilatada experiencia en la modelación hidrogeológica aplicada al área minera, participó en la visión y enfoque de la modelación a los proyectos de ingeniería civil.

A la empresa Perforaciones e Instalaciones FERRER, S.L. y su equipo, donde inicié mi experiencia de la mano de mi padre, **José Ferrer**, y donde se me ha permitido aplicar la formación teórica. También por haber sido fuente de información, datos e imágenes reales.

A mi esposa, **Esther**, por su apoyo incondicional, y mis hijos **Paula** y **Adrián**, que no me lo hicieron difícil.