

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA**

**APROXIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA NAPA EN EL SECTOR  
CÉNTRICO DE LA CIUDAD DE VIÑA DEL MAR, EN EL MARCO DEL PROYECTO  
IV ETAPA.**

**RAÚL GALINDO URRA.<sup>1</sup>  
MARCELO BRAVO FORTUNE.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

Durante el año 2004 y comienzos del 2005 se efectuaron las principales obras de soterramiento de la línea férrea del Metro – Tren regional, la que atraviesa el sector céntrico de la ciudad de Viña del Mar. Lo anterior formaba parte del Proyecto IV Etapa, donde el Centro de Estudios e Investigación en Infraestructura del Departamento de Obras Civiles de la UTFSM, participó como asesor de acompañamiento a las labores de seguimiento y monitoreo de la misma.

Dada la magnitud y configuración del proyecto (extensión, ubicación y fuerte presencia de napa) se estimó necesario realizar una aproximación del comportamiento de la napa antes, durante y después de la ejecución de las obras. Esta se desarrolló por los autores del presente trabajo con el programa Visual MODFLOW, bajo supuestos razonables y un acabado análisis de posibles escenarios, lo que permitió en el marco de lo teórico, establecer anticipadamente posibles situaciones de riesgo y entregar alternativas de solución.

Los resultados obtenidos con anticipación al término de la construcción de una pared moldeada doble en toda la extensión entre el Salto y Caleta Abarca, obra fundamental del proceso constructivo global, se comparan con los valores finales monitoreados durante la construcción, obteniéndose interesantes conclusiones.

---

<sup>1</sup> Profesor Titular, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María - mail: [raul.galindo@usm.cl](mailto:raul.galindo@usm.cl)

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, Centro de Estudios e Investigación en Infraestructura, UTFSM – mail: [marcelo.bravo@usm.cl](mailto:marcelo.bravo@usm.cl)



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Durante el año 2004 y comienzos del 2005 se efectuaron las principales obras de soterramiento de la línea férrea del Metro – Tren regional, la que atraviesa el sector céntrico de la ciudad de Viña del Mar. Lo anterior formaba parte del Proyecto IV Etapa, donde el Centro de Estudios e Investigación en Infraestructura del Departamento de Obras Civiles de la UTFSM, participó como asesor de acompañamiento a las labores de seguimiento y monitoreo de la misma. El trazado soterrado implicó la construcción de una zanja de unos 14 m de profundidad y 8 m de ancho en el sector del túnel y 14 m de ancho en el sector de las estaciones, en una extensión total aproximada de 5000 m.

El proyecto en sí presentaba un desafío a la ingeniería civil, considerando su emplazamiento en un centro urbano altamente congestionado y carente de vías alternativas. A lo anterior, hay que agregar la cercanía del estero de Viña del Mar y la existencia de una napa que se encuentra en promedio a 5 m de profundidad del nivel del suelo, pero en especial el método constructivo utilizado, excavación entre 2 paredes moldeadas paralelas a todo lo largo del trazado.

El contar con una aproximación del comportamiento de la napa antes, durante y después de la ejecución de las obras, se estimó como técnicamente apropiado, y para tales efectos se desarrolló una modelación con el programa Visual MODFLOW, bajo supuestos razonables. Esto incluyó un acabado análisis de posibles escenarios, lo que permitió en el marco de lo teórico, establecer anticipadamente posibles situaciones de riesgo y entregar alternativas de solución.

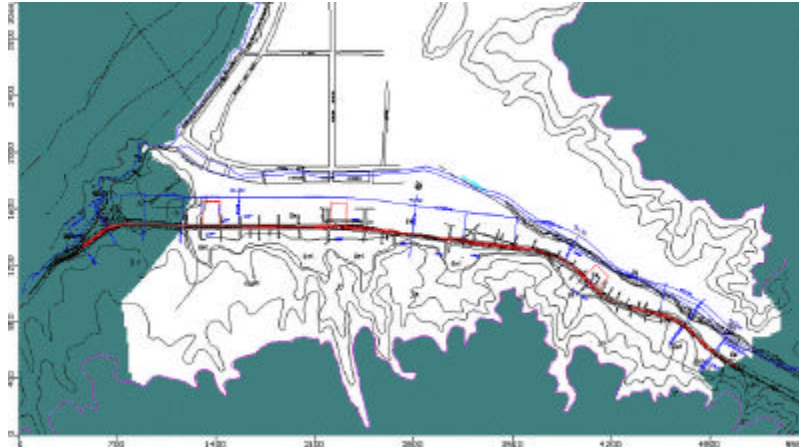
A partir de lo anterior, el presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- Presentar los resultados de una aproximación mediante modelación del comportamiento de la napa antes del inicio de la ejecución de las obras, sobre la base de sondeos realizados en el trazado del proyecto.
- Presentar a partir de lo anterior, el efecto del túnel en el comportamiento y recarga de la napa, así como estimar tendencias y rangos esperables en el impacto potencial del abatimiento o represamiento en edificaciones adyacentes a la zona de excavación.
- A partir de dichos resultados y aquellos provenientes del monitoreo en terreno del nivel efectivo de la napa durante el desarrollo de las obras, comparar y discutir ambos.

En síntesis el presente trabajo apunta a evaluar el efecto que sobre la napa subterránea del sector aledaño a las obras del metro tren, ejerce la doble pared moldeada elaborada con fines constructivos.

## 2. METODOLOGÍA

Para la formulación del modelo se consideraron antecedentes de tipo topográfico, geotécnico, geológico, hidrológico e hidráulico. Su origen corresponde a material desarrollado por el proyectista Consorcio Arcadis (2002) y antecedentes bibliográficos provenientes de diferentes fuentes nacionales.



**Figura 1 Esquema del área de estudio**

Dada la particular disposición del proyecto dentro de una zona de modelación considerada como apropiada (Figura 1), se debieron incluir las siguientes condiciones de borde de tipo temporal: el borde costero (Constant Head, CHD), el Estero Marga Marga (River, RIV), la pared moldeada (Wall, HFB), la precipitación (Recharge, RCH) y el caudal aguas arriba del estero (River, RIV).

Si bien la cercanía del borde costero podría haber dado lugar, para alcanzar una mayor precisión, al empleo de un modelo que considerara esa condición (por ejemplo SHARP), la disponibilidad de una versión actualizada de MODFLOW y su mayor facilidad de manejo de la entrada y salida de datos, amplitud de condiciones operacionales, etc., determinó finalmente su uso.

La aplicación parcial de las condiciones o el conjunto de ellas, estuvo sujeta a los objetivos perseguidos y los escenarios adoptados.

## 2.1 Modelación base. Calibración

Para los efectos de la calibración del modelo se consideró como nivel inicial de la napa la cota cero m.s.n.m. y las condiciones de borde aproximadas del borde costero, del Estero Marga Marga y del caudal aguas arriba del estero.

El Estero Marga Marga se consideró con una pendiente del 3 por mil en una longitud aproximada de 4600 km. La permeabilidad del lecho del estero se consideró con un valor  $k = 1 \cdot 10^{-7}$  m/s. Aguas arriba del estero, se adoptó una condición que simulará el caudal en época de estiaje (400 l/s), entrante al sistema en su límite Oriente.

La permeabilidad de los suelos inicialmente adoptada, así como otros valores considerados en la fase inicial del modelo, corresponden a los utilizados previamente por Arcadis (2002), tal como se señala en la Tabla 1:

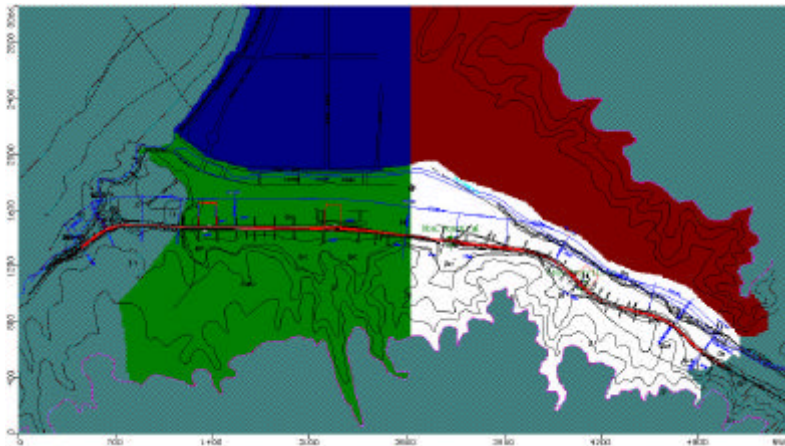
**Tabla 1. Valores de entrada al Modelo**

Parámetros	Valores
Permeabilidad horizontal sentido Oriente –Poniente, $k_x$ (m/s)	$5 \cdot 10^{-5}$
Permeabilidad horizontal sentido Norte –Sur, $k_y$ (m/s)	$5 \cdot 10^{-5}$
Permeabilidad vertical, $k_z$ (m/s)	$5 \cdot 10^{-4}$
Retención Específica, $S_s$ (1/m)	$1 \cdot 10^{-4}$
Capacidad Específica, $S_y$	0.2
Porosidad	0.15

Fuente: Elaboración Propia

Para la modelación base se contempló la variación de la permeabilidad en los ejes Norte-Sur y Oriente-Poniente, además de una variación por zonas (cuatro zonas definidas: Norte-Poniente, Norte-Oriente, Sur-Poniente y Sur-Oriente; Figura 2). Las líneas divisorias imaginarias de las zonas corresponden al Estero Marga Marga (divide área de análisis en Norte y Sur) y al límite entre los Tramos B-C ubicado entre las Estaciones de Viña y Hospital (divide área de análisis en Poniente y Oriente).

El análisis por zonas se realizó en cuatro etapas, con un período de simulación equivalente a 360 días para asegurar la estabilidad del sistema. La primera consideró el área total de análisis, la segunda una zona Poniente y otra Oriente, la tercera una zona Norte y otra Sur y por último las cuatro zonas anteriormente señaladas. La permeabilidad aplicada en el análisis, fluctuó en el rango de  $4 \cdot 10^{-6}$  a  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s para la permeabilidad horizontal ( $k_x$ ,  $k_y$ ) y en un rango 10 veces mayor para la permeabilidad vertical ( $k_z$ ).

**Figura 2 Zonas de análisis de permeabilidad del suelo**

## 2.2 Modelación. Situación con proyecto

A partir de la validación del modelo (situación ex - ante la construcción de las obras), se incorporó en éste una condición de borde local (Wall, HFB) mediante un elemento que simuló al muro estructural de hormigón armado denominado pared moldeada doble (espesores entre 0.6 a 0.8 m). La finalidad de ésta era sostener el suelo adyacente durante la excavación (sector Norte

y Sur), para luego albergar la estructura definitiva del túnel. De esta manera fue posible estimar teóricamente, la nueva configuración del nivel freático antes del inicio de la excavación masiva.

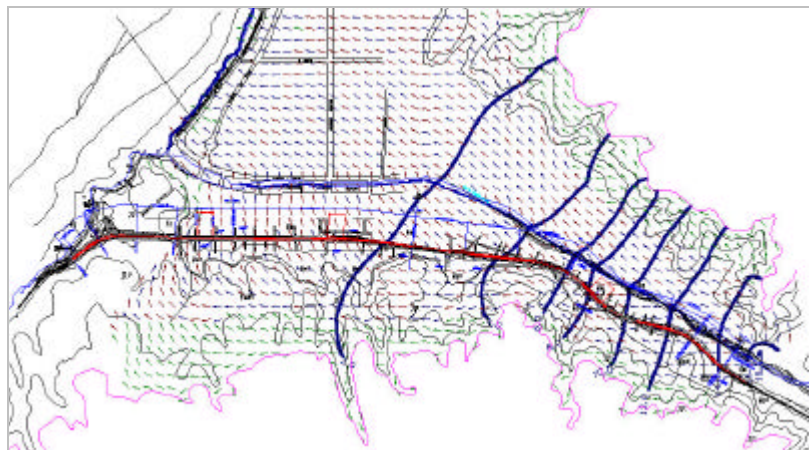
La incorporación de la anterior estructura, se secuenció en el tiempo según la programación de obras (tramos constructivos parciales de ella), modelando temporalmente estos escenarios secuenciales (aproximadamente un 33%, 66%, 90% y 100% de su longitud total, obviamente con discontinuidades). Además se incluyó la disposición constructiva vertical de la misma, en donde en ciertos tramos se alcanzaba una penetración total del acuífero por la pared (hasta la roca base) y en otros sólo parcial. La información necesaria para esto, se obtuvo de la programación oficial de la obra entregada por la gerencia de ella.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 Calibración

El proceso de calibración del modelo se llevó a cabo mediante un procedimiento simple de aproximaciones sucesivas de variación de la permeabilidad y de razonable validez con fines de ingeniería práctica. Éste se consideró cumplido satisfactoriamente, una vez que los resultados obtenidos del análisis indicaron la estabilidad del sistema, una dirección apropiada de la napa y valores de cota razonable, similares a los indicados en los planos del proyecto (puntos de sondeo ubicados en las estaciones del metro tren).

La condición final de calibración se indica en la Figura 3 donde se aprecian las curvas equipotenciales (azul oscuro) y la dirección del flujo, destacándose como fuente principal de alimentación el Estero Marga Marga o de Viña del Mar.



**Figura 3** Condición al final del período de análisis.

Los parámetros y el resultado adoptado en función de los criterios de calibración del modelo, se indican en las Tablas 2 y 3 respectivamente.

**Tabla 2. Valores de permeabilidad por zonas adoptadas**

Zonas	Permeabilidad, m/s		
	$k_x$	$k_y$	$k_z$
Norte-Poniente	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
Norte-Oriente	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$
Sur-Poniente	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$
Sur-Oriente	$5.0 \cdot 10^{-5}$	$5.0 \cdot 10^{-5}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. Nivel de la napa en estaciones**

Estación	Nivel msnm.		
	Sondeos	Arcadis	Modelo
Miramar	1.00	0.56	1.24
Viña	1.50	1.45	1.47
Hospital	3.80	2.94	3.10
Chorrillos	7.30	5.24	7.84

Fuente: Elaboración propia

El análisis de permeabilidad realizado por zonas, permitió a través de la modelación, apreciar valores del nivel de la napa con diferencias de hasta 2.5 m para la estación Miramar y de 7 m para la estación Chorrillos, manifestando la sensibilidad de los parámetros del suelo en los resultados del modelo.

Cabe señalar que el valor de permeabilidad adoptado en la zona Norte-Poniente ( $1 \cdot 10^{-3}$  m/s), corresponde a suelos formados principalmente por arenas. Para las zonas restantes los valores de permeabilidad se ajustan a suelos menos permeables, tal como los efectivamente prospectados.

Respecto de las condiciones de borde empleadas en el modelo, estas trataron de representar de manera apropiada el comportamiento del sistema real. A diferencia del modelo de Arcadis, el modelo aquí desarrollado no incorpora las recargas laterales del sector Sur, debido a que se estima que su aporte a la napa bajo las condiciones del tipo de suelo, la pavimentación, la cercanía del límite Sur del acuífero a las obras y de la urbanización existente, resultaría poco significativo. Se estimó que el mayor impacto a la recarga se origina en las riberas del estero.

### 3.2 Situación con proyecto

Para la representación de la condición con proyecto, se prefirió representar los resultados mediante un perfil longitudinal de los niveles simulados para las distintas fases constructivas de la obra (según lo señalado en 2.2) y en toda su longitud. Se eligió la ubicación externa adyacente a la pared moldeada Sur, por ser la más relevante desde el punto de vista de la ingeniería y del impacto sobre el entorno de la obra.

Como Figura 4, se incluyen los resultados obtenidos y representados en los siguientes perfiles de mayor interés:

- Nivel de suelo
- Nivel freático sin proyecto (de los sondeos de proyecto)
- Localización del nivel freático con un 33% de la obra construida (1ra fase)
- Localización del nivel freático con un 66 % de la obra construida (2da fase)
- Localización del nivel freático con un 90 % de la obra construida (3ra fase)
- Localización del nivel freático con un 100 % de la obra construida (4ta fase)

Muy claramente de esta secuencia se advierte el impacto creciente de la construcción de la obra, situándose en niveles críticos respecto del suelo en ubicaciones que corresponden a la zona de la estación Miramar del Metro – Tren.

Para efectos de contraste, en la misma Figura 4 se anexó un nuevo perfil:

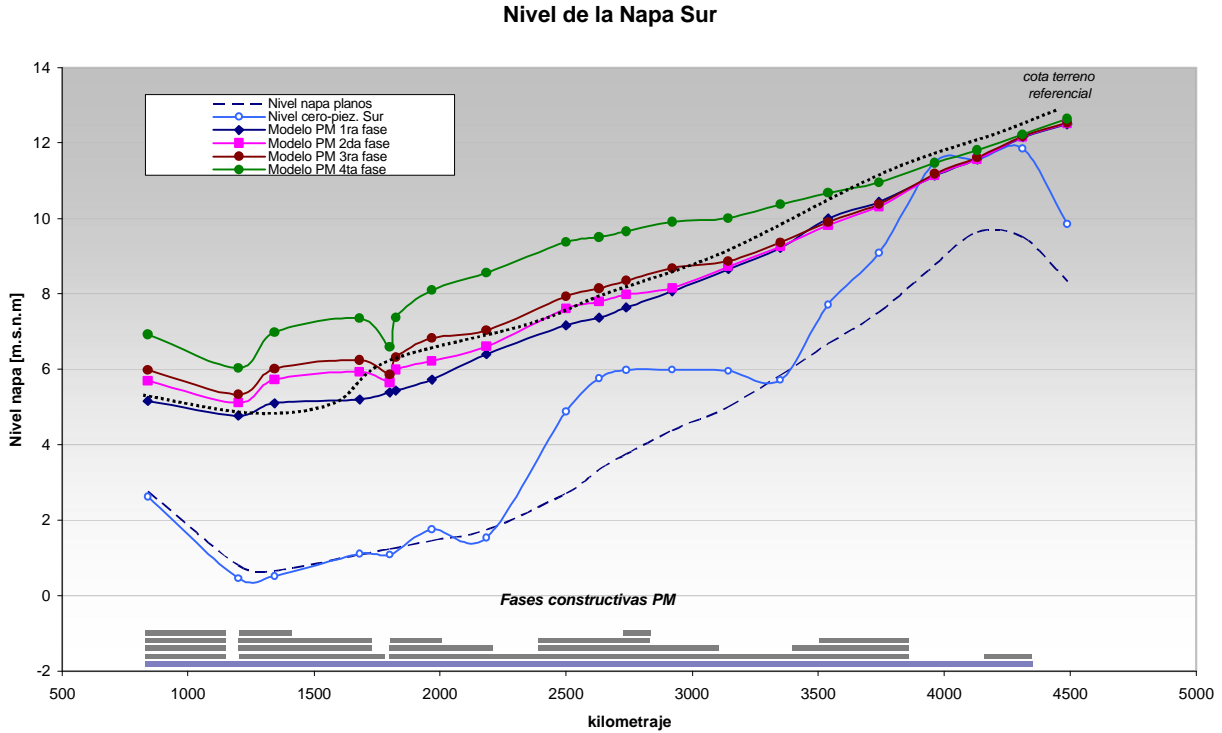
- Nivel del nivel freático monitoreado durante la obra (aproximadamente al final de la construcción de la Pared moldeada).

De la comparación entre el nivel simulado para la condición extrema (100 % de construcción de la obra) y monitoreado, se desprende lo siguiente:

- a.- El represamiento modelado en el costado externo de la pared moldeada Sur, se situaría por arriba del valor medido, lo cual avala el empleo seguro de esta herramienta de análisis “ex – ante” la construcción de la obra. Se destacan lugares en donde el nivel definitivo de la napa se acerca notablemente al nivel de terreno.
- b.- Se advierten diferencias entre ambos perfiles, aunque en algunos lugares se acercan sustantivamente. Lo primero se debe en principio, a que la curva simulada representa una condición límite y la monitoreada una transiente, el que además incluye medidas no siempre simultáneas temporalmente. Además, las mediciones reales contienen efectos del agotamiento de la napa efectuadas durante



algunas fases de excavaciones, llevadas a cabo paralelamente con la construcción de la pared moldeada. Esto no fue simulado en la misma secuencia, por razones obvias de una ausencia fina previa de la programación de la obra en su conjunto.



**Figura 4 Nivel de la Napa lado Sur.**

#### 4. CONCLUSIONES

Del anterior desarrollo se desprende:

- Los valores obtenidos de la calibración del modelo que se presentaron se ajustaron de manera adecuada a los datos del nivel de la napa medida ex - ante la construcción de las obras en las zonas señaladas, satisfaciendo plenamente el objetivo número uno señalado inicialmente.
- Durante el proceso de simulación se apreció que las condiciones de borde tienen una incidencia relevante en el comportamiento del modelo. Razón por la cual, se requiere un cuidadoso y juicioso análisis técnico de ellas, para evitar resultados que posteriormente incidan negativamente durante el desarrollo de las obras (por el lado de la inseguridad). Hay que considerar en esto, que durante la fase de proyecto o previa a las obras, la profesión está arriesgando al máximo su rol, lo cual es particularmente válido en obras de esta trascendencia pública.

- c) De igual manera, el poder contar con una programación previa clara y ajustada de la secuencia constructiva de las obras, es un factor decisivo para una buena modelación. A esto contribuye de manera importante, una buena gestión de coordinación de la gerencia de la obra de los distintos actores involucrados en ella.
- d) El modelo utilizado, el MODFLOW, resultó ser una herramienta flexible y útil para enfrentar este tipo de problemas de ingeniería civil práctica.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se expresa de parte de los autores del presente trabajo, un especial agradecimiento a la gerencia de Merval, por las facilidades otorgadas y por la información suministrada, fruto de su eficiente y destacado trabajo profesional.

## **REFERENCIAS**

Consortio Arcadis, 2002. Estudio de Niveles Freáticos. Proyecto IV Etapa, Interconexión Vial Valparaíso - Viña del Mar.

IGM, 2003. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.

Demmel, J.W., 1997. Applied Numerical linear algebra: Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 419 p.

Mehl, S. W. and Hill, M C. 2001. MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – User Guide To The Link-AMG (LMG) Package For Solving Matrix Equations Using An Algebraic Multigrid Solver, U.S. Geological Survey Open-File Report 01-177.