

DRAINAGE OF THE N4E IRON OPEN PIT MINE. CARAJÁS (BRAZIL). HYDROGEOLOGICAL MODEL

Juan Carlos Baquero Úbeda¹, Rafael Fernández-Rubio^{1,2}, Andrés León Fábregas¹, David Lorca Fernández¹,
Raimundo F. Júnior³

¹FRASA Ingenieros Consultores, S.L.
Luna, 45

28120 Ciudad Santo Domingo (Madrid), Spain
Phone: + 34 91 6221078. Fax: + 34 91 6221983
e-mail: frasaing@mx4.redestb.es

²Madrid School of Mines. Madrid Polytechnic University
Ríos Rosas, 21
28003 Madrid, Spain
Phone: + 34 91 3367055. Fax: + 34 91 3366977

³Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). Superintendencia das Minas de Carajás
Serra dos Carajás, s/n
68516000 Parauapebas, PA, Brazil
Phone: + 55 913 274054. Fax: + 55 913 274109
e-mail: rjunior@cvrd.com.br

ABSTRACT

In the N4E Mine owned by Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), high quality iron ore mineral (basically hematite) is extracted. The mine operation require a large continue drainage due that the ore body is located below the groundwater table, and due to the very high rainfall. The ore body drainage presents special characteristics as consequence of the lithological and geotechnical characteristics. To implement an adequate Drainage Plan conceptual and mathematical models has been developed.

The application of hydrogeological models, to the mining's Drainage Plan, allow to optimise the number and locations of wells and underground drains, and to predict the evolution of water table and drainage flows, along the time. MODFLOW was employed as tridimensional model.

ANTECEDENTES

La mina N4E se localiza en la región de Serra dos Carajás, municipio de Parauapebas. Estado de Pará (Brasil).

En 1995, se planteó la realización de un modelo hidrogeológico del entorno de la mina N4E, con el objetivo de establecer las estrategias de drenaje y predecir la evolución de caudales y niveles piezométricos con el tiempo.

La herramienta de modelización seleccionada fue MODFLOW, empleando Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic Software) como software de pre/post-tratamiento.

Paralelamente al desarrollo del modelo, se plantearon los controles hidrogeológicos que deberían realizarse, con el fin de:

- establecer la evolución de las principales variables climatológicas (pluviometría y evaporación),

- caracterizar hidrogeológicamente el entorno (límites, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y evolución piezométrica),
- calcular los caudales drenados desde cada sondeo, y
- aforar el agua desaguada a través del canal de drenaje.

Todos estos datos, fueron de gran importancia a la hora de definir el modelo (conceptual y numérico).

La modelización numérica del entorno, se llevó a cabo en dos etapas. Inicialmente, se realizó un *modelo preliminar*, con el fin de analizar las evoluciones piezométricas y valorar la calidad y distribución de parámetros disponibles. En base a los resultados obtenidos y recomendaciones propuestas, se ha iniciado, en 1998, una modelización más exacta (*modelo detallado*).

La filosofía de esta modelización, se basa en la necesidad de crear una herramienta dinámica, sujeta a progresiva calibración (de acuerdo con la adquisición de nuevos registros), contribuyendo al entrenamiento de los técnicos de CVRD que deban manejarlo, con el fin de optimizar la simulación de las diferentes alternativas de drenaje.

MODELO CONCEPTUAL

Geología del entorno

El basamento del sector en estudio (*Complejo Xingú*), no aflora en ningún punto del entorno modelizado. Está compuesto por gneises graníticos, granodioríticos y tonalíticos, migmatitas, anfibolitas, rocas máficas y ultramáficas.

Sobre este complejo aparece una secuencia vulcano-sedimentaria de edad arqueana, que integra formaciones ferríferas junto a lentejones de rocas silíceas, y se acompaña de grandes volúmenes de rocas basálticas y riolíticas. Se trata de los materiales del *Grupo Grao Pará*, que integra las siguientes formaciones (figura 1):

- **formación Parauapebas**, rocas volcánicas con intercalaciones de vulcanitas félsicas (basaltos y riolitas, con raras intercalaciones de formaciones ferríferas bandeadas),
- **formación Carajás**, jaspillito típicamente bandeado, asociado a sílice, con pigmentación de hematites, y bandas oscuras de hematites, con magnetita y martita subordinadas, que incluye óxidos de hierro (jaspillito como proto-minero), y
- **formación Igarapé Cigarra**, rocas sedimentarias químicas y sills de rocas máficas (basaltos, diabasas, tobas volcánicas, argilitas, bandeados de hierro, carbonatos de manganeso, cherts, cuarzo-grauwackas y cuarzo-arenitos). Guarda semejanza con la *Formación Parauapebas*.

El jaspillito consiste en una secuencia rítmica de bandas de sílice (cuarzo y calcedonia), alternantes con bandas ricas en hierro (hematites y, en menor cantidad, magnetita), donde se ha producido un enriquecimiento supergénico, por circulación de aguas de infiltración y su correspondiente lixiviado, que ha dado lugar a la concentración de óxido de hierro (hematites), en tanto en cuanto que la sílice era lixiviada.

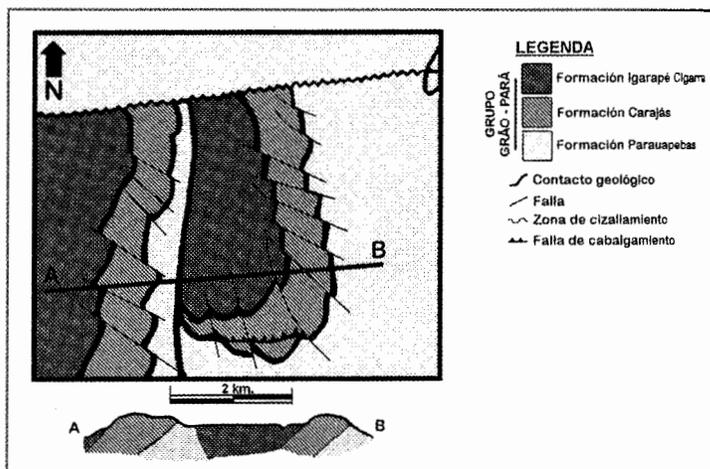


Figura 1. Croquis tectónico del yacimiento N4 (donde se localizan las minas N4E y N4W).

La *Formación Parauapebas* y la *Formación Carajás*, se encuentran atravesadas por diques de rocas máficas (diabasas), de posible edad paleozoica, muy alteradas hidrotermalmente, pero conservando su estructura de rocas ígneas. En muchos casos no atraviesan completamente la *Formación Carajás*. Su anchura aumenta en profundidad (de 15 a 20 m), y su longitud llega a superar la centena de metros.

Estas inyecciones basálticas se localizan a favor de fallas (con direcciones preferentes: NE-SW a E-W), posteriores al enriquecimiento en mineral, produciendo cierto metamorfismo de contacto en los jaspillitos y hematites, con espesor del orden de 5 m.

En superficie, se extiende una costra laterítica, que se desarrolla sobre las diferentes formaciones, dando lugar a la denominada "canga química" y "canga do mineiro", esta última predominantemente sobre la *Formación Carajás*. Su espesor medio oscila entre 2 m al Este de la mina y 5 m al Oeste (donde se ha producido mayor disolución química). Se trata de un material muy permeable, que presenta gran cantidad de huecos.

La falla que separa los cuerpos mineralizados N4E y N4W, con un desplazamiento del orden de 4 km, pone en contacto al jaspillito del yacimiento N4E (*Formación Carajás*), con materiales máficos plásticos (*Formación Parauapebas*), de base del cuerpo N4W, que lo cierran por el Oeste.

Las fallas que cruzan la mineralización tienen dos direcciones principales: NW-SE y N-S. En el extremo septentrional del yacimiento, se observan fallas secundarias NE-SW y E-W. Todos estos accidentes estructurales corresponden a fallas tardías distensivas, en relación con la denominada *Falla de Carajás*, a favor de las cuales se desarrollaron intrusiones máficas que las sellaron y consolidaron la brecha tectónica.

El yacimiento N4E presenta una morfología en planta en forma de "J", con la concavidad orientada hacia el NW. Se extiende en dirección N-S a lo largo de una banda de 3-4 km de longitud, con buzamiento general de 30°-40° W.

En la inflexión del yacimiento aparece un sinclinal, a favor del cual ha tenido más desarrollo la lixiviación del proto-mineiro, con lo que la mineralización explotable de hematites se extiende hasta mayor profundidad, hasta donde ha podido llegar el agua de percolación, a favor de los materiales cuya permeabilidad permitía dicha circulación acuífera subterránea.

El conjunto del yacimiento se hunde longitudinalmente de Norte a Sur, de tal manera que, en el sector más septentrional, al estar más erosionado, es donde aparecen con más abundancia los jaspillitos de base. Por idéntica razón, en este sector, tienen mayor representación los afloramientos de diques de diabasa.

La mineralización adopta la forma de "quilla de navío tumbado", limitada en profundidad por el propio jaspillito no lixiviado y, a techo y muro, por las formaciones máficas. Esta masa de hematites se encuentra atravesada por diques internos de rocas máficas (diabasas muy alteradas), que compartimentan al yacimiento.

Climatología

Tanto la pluviometría como la evaporación producida en el entorno, pueden establecerse en base a los registros obtenidos en las Estaciones Climatológicas más próximas: Carajás (aeropuerto) y Mirante (instalada en el borde oriental de la mina N4E). Dado que la Estación de Mirante se encuentra dentro del área en estudio, ha sido seleccionada para caracterizar tanto la pluviometría como la evaporación del sector modelizado.

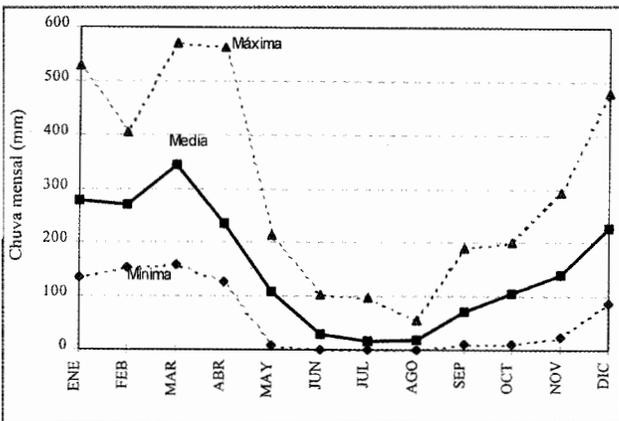


Figura 2. Lluvia mínima, media y máxima, mensual registrada en Mirante.

A lo largo de 16 años de observación, la pluviometría anual ha variado entre 1.335 mm (1990, año muy seco) y 2.630 mm (1985, año muy lluvioso), con una precipitación media anual de 1.848 mm. La pluviometría media mensual, ha variado entre los 16 mm registrados en julio y 345 mm obtenidos en marzo, correspondiendo los meses más secos a junio-agosto y los más lluviosos a diciembre-abril. La lluvia mensual máxima fue registrada en marzo de 1983 (571 mm).

La evaporación anual ha variado entre 1.020 mm (año 1989) y 1.363 mm (año 1996), con un valor medio

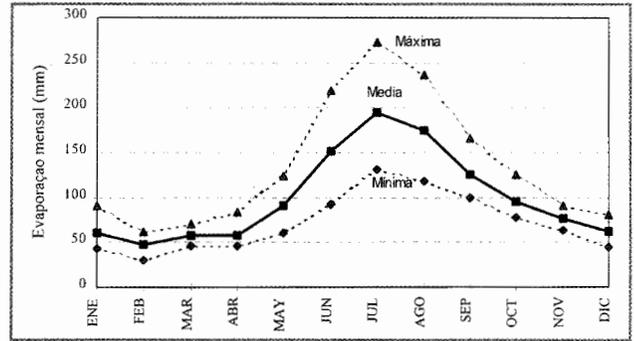


Figura 3. Evaporación potencial mensual mínima, media y máxima, registrada en Mirante.

anual de 1.185 mm. La evaporación mínima mensual suele producirse en febrero (con un valor medio de 48 mm), cuando las temperaturas son menores, mientras que la evaporación máxima mensual se registra en julio (con un valor medio de 195 mm).

Drenaje minero

El sistema acuífero minero se ha venido drenando, de manera ininterrumpida, durante los últimos siete años, mediante sondeos verticales, perforados con diámetro de 17", entubados con tubería de 10" y empleo de empaque de grava clasificada.

Durante estos años, se han realizado 35 sondeos de drenaje (denominados PÇ): 15 se mantenían operativos en diciembre de 1997, 7 permanecían desactivados temporalmente, 6 habían sido destruidos y 7 fueron transformados en piezómetros tras su abandono. Además, se dispone de una galería de desagüe (de 2.400 m de longitud) excavada bajo el fondo de la explotación a cielo abierto.

Mediante 5 sondeos de conexión con la galería de drenaje (denominados PG), se logra evacuar por gravedad el agua acumulada en el fondo de mina (procedente del drenaje minero y de las lluvias recogidas). Alguno de estos sondeos, además, drena por sí mismo parte del acuífero.

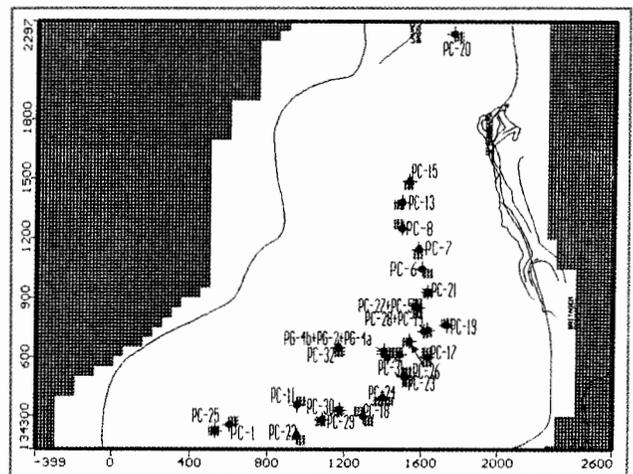


Figura 4. Localización de sondeos y drenajes subterráneos, activos en diciembre de 1997. Detalle del sector de confianza.

Piezómetros de control

Desde agosto de 1990, se han construido 125 piezómetros (denominados PZ), donde se ha controlado el nivel de agua con una frecuencia de 3 a 20 medidas mensuales. Debido a la actividad minera, los períodos útiles de registro no son, en general, muy prolongados. Por esta causa, en diciembre de 1997, sólo permanecían 11 piezómetros operativos, más otros 7 sondeos de drenaje que fueron equipados como piezómetros.

MODELO NUMÉRICO

Discretización geométrica

El área modelizada corresponde a un rectángulo, dentro del cual se encuentra la mina N4E. De acuerdo con la geología y la localización de los sondeos de drenaje y los piezómetros de control, se definió, tanto en el *modelo preliminar* como en el *modelo detallado*, un mallado rectangular de 55 columnas según el eje X y 68 filas según el eje Y. El tamaño de las celdas varía entre 50x50 m (sector con mayor densidad de datos) y 100x100 m (área más alejada de la mina).

La discretización vertical del acuífero se ha realizado mediante 16 capas, de espesores variables entre 15 y 65 m, en función de la geología. El modelo se ha extendido en profundidad hasta la cota 120 m s.n.m., con el fin de garantizar un fondo impermeable.

En total, se han definido 59.840 celdas (3.740 celdas por capa), reduciendo el número de celdas activas donde la geología es impermeable y se encuentra más alejada de la corta.

Se denomina **sector de confianza** a la restricción del área modelizada donde, debido a una mayor densidad de datos (caudales, definición geológica, etc.) y menor grado de incertidumbre (condiciones de contorno, piezometría inicial, piezometría de calibración, etc.), los resultados de la simulación se ajustan, con la exactitud deseada, a la realidad.

La superficie topográfica, introducida en el modelo, corresponde al estado en que se encontraba la mina y su entorno, en abril de 1995.

Discretización temporal

El período de tiempo modelizado, se ha establecido en base a los datos temporales disponibles (cronograma de funcionamiento de sondeos de drenaje y piezométricos de control), piezometría inicial y variación climática estacional (época de lluvias y seca).

El período seco, habitualmente de junio a agosto, se caracteriza por la escasez de lluvias, produciéndose una elevada tasa de evaporación, debido a las altas temperaturas registradas. En cambio, durante la época de lluvias, de septiembre a mayo, se producen intensas lluvias, frente a una moderada evaporación y temperatura.

Dado el corto período de calibración disponible en el *modelo preliminar* (01/04/95 - 31/12/95) y a la escasez de datos

foronómicos disponibles, fue definida una discretización temporal de 275 días, en **régimen estacionario**, con el fin de reducir el grado de incertidumbre.

En cambio, al disponer de bastantes más datos a la hora de construir el *modelo detallado*, fue posible ampliar el período de calibración (01/06/95 - 01/10/97) hasta 853 días, definiendo un **régimen transitorio**, dividiendo el tiempo modelizado en cinco períodos, ajustados mensualmente, con el fin de adaptarlos a la disponibilidad de registros de bombeo.

PERÍODO	INTERVALO	ÉPOCA	DURACIÓN (días)	ACUMULADO (días)
Inicio de la modelización (t_0): 01/Jun/95				
PRIMERO	01/Jun/95-01/Sep/95	SECA	92	92
SEGUNDO	01/Sep/95-01/Jun/96	LLUVIAS	274	366
TERCERO	01/Jun/96-01/Sep/96	SECA	92	458
CUARTO	01/Sep/96-01/Jun/97	LLUVIAS	273	731
QUINTO	01/Jun/97-01/Oct/97	SECA	122	853

Tabla 1. Discretización temporal en el modelo detallado.

Piezometría inicial

En condiciones previas, al inicio de la explotación minera, el nivel freático se encontraba muy próximo a la superficie del terreno.

En las etapas iniciales del drenaje minero, realizado mediante sondeos verticales, cuando el nivel piezométrico del acuífero constituido por la *Formación Carajás* se situaba, en general, sobre los diques de diabasas, los conoides de drenaje mostraban mayor desarrollo horizontal que en la actualidad. Posteriormente, al ir descendiendo los niveles piezométricos e interceptar dichos conoides los diques de diabasas, existentes en el interior de la *Formación Carajás*, comenzó a reflejarse el efecto de una compartimentación hidrogeológica, con bloques diferenciados, al actuar los diques como barreras impermeables.

La piezometría inicial, que se empleó en el *modelo preliminar*, al no disponer apenas de datos, fue calculada en base a la hipótesis de que en los valles (sectores de menor cota) se mantenía el nivel de agua muy próximo a la superficie, mientras que en cumbres y collados (sectores de mayor cota), se encontraba algo más profunda.

En rigor, al definirse el *modelo preliminar* en régimen estacionario, apenas afecta al resultado la piezometría inicial empleada, dado que la situación piezométrica final corresponde al equilibrio alcanzado entre todos los datos introducidos en el modelo.

En cambio, al definir el *modelo detallado* en régimen transitorio, la definición de la piezometría inicial es más delicada y debe ser determinada con mayor precisión, al menos, dentro del sector de confianza, ya que tiene gran influencia sobre los resultados obtenidos durante los primeros períodos simulados.

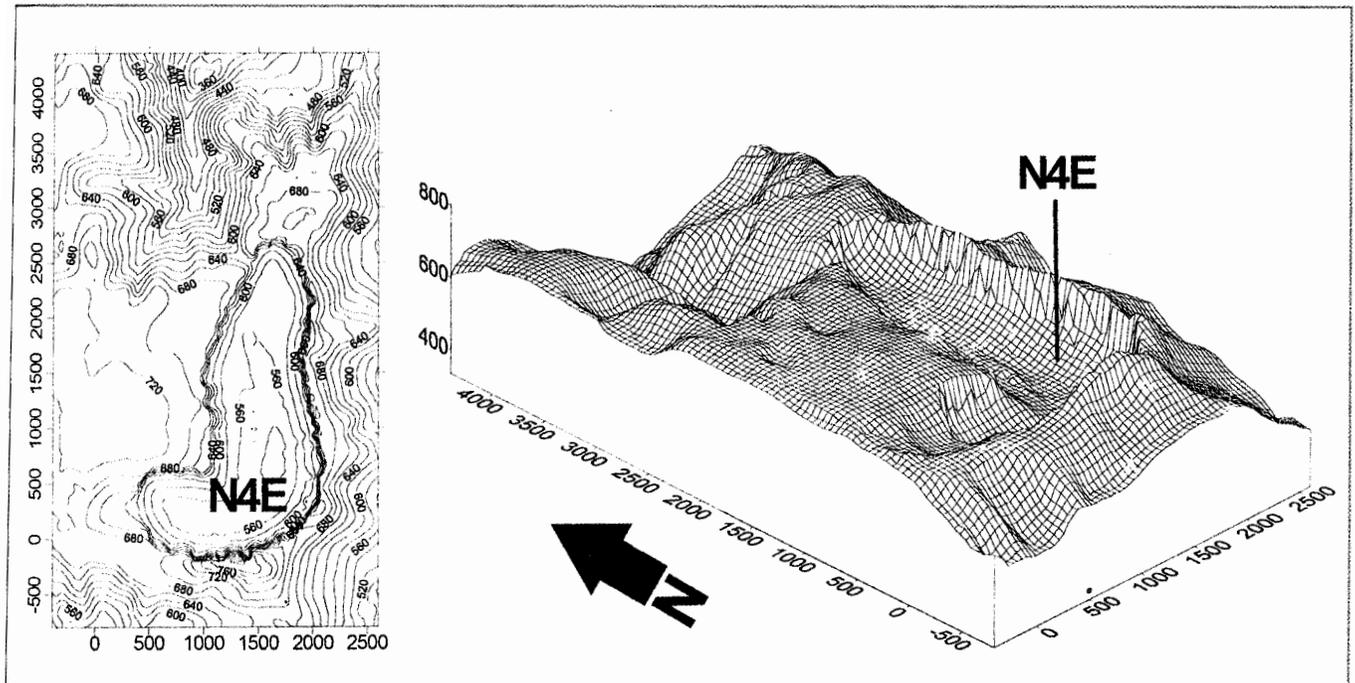


Figura 5. Piezometría inicial definida en el modelo detallado (junio/1995).

Por ello, la piezometría inicial, en el interior de N4E, se calculó a partir de los registros de nivel de agua, obtenidos en los 14 piezómetros que permanecieron activos en junio de 1995, teniendo en cuenta la morfología de los taludes mineros y la disposición litológica de los materiales. En el exterior de la mina, donde no existían registros piezométricos, se estimó en función de la cota topográfica, aplicando el mismo criterio que fue empleado en el *modelo preliminar*.

En ambas modelizaciones (*preliminar y detallada*) se ha considerado la existencia de un acuífero multicapa, suponiendo igual piezometría inicial para las 16 capas simuladas.

Parámetros hidrogeológicos

La lixiviación de la sílice, que se ha producido en el jaspillito, supone un incremento de la permeabilidad, si bien, la posterior compactación de la masa mineral, ha disminuido esta porosidad secundaria ocasionada por la lixiviación.

En este contexto, hemos adoptado la siguiente agrupación de materiales litológicos, en función de su comportamiento hidrogeológico:

- **Materiales acuífugos** (sin agua). Engloban, fundamentalmente, a las rocas máficas: *Formación Parauapebas*, *Formación Igarapé Cigarra* y diques de diabasas dentro de la *Formación Carajás*. Este grupo de materiales acuífugos engloba, también, al jaspillito no lixiviado. Se definen en el modelo como celdas inactivas o impermeables.
- **Materiales acuícludos** (almacenan agua, pero no la transmiten). Fundamentalmente se trata de las masas de argilita presentes en el área modelizada.

Se han definido en el modelo como materiales impermeables, siempre que sus espesores han sido significativos.

- **Materiales acuitardos** (almacenan agua que transmiten muy lentamente). Se trata de conjuntos litoquímicos que mantienen cierta porosidad, pero que no ofrecen internamente buena conexión hidrológica. En este grupo englobamos a la canga do mineiro, canga química y laterita. En el modelo se consideran como semipermeables.
- **Materiales acuíferos** (almacenan agua y la pueden transmitir). Se ha incluido la hematites compacta y hematites friable. En este grupo hemos diferenciado tres subgrupos:
 - * *media permeabilidad*, definidos en el modelo como permeables,
 - * *alta permeabilidad*, definidos en el modelo como permeables, y
 - * *muy alta permeabilidad*, definidos en el modelo como muy permeables.

Las conductividades hidráulicas asignadas, varían entre 0,001 - 0,8 m/día, dependiendo del material. La permeabilidad en sentido vertical, es siempre menor que la asignada en capa, cumpliéndose las siguientes relaciones:

$$K_x = K_y \text{ y } 0,1 \cdot K_x < K_z < K_x$$

El coeficiente de almacenamiento de todos los materiales simulados, cuando están en condiciones confinadas (S_s), se ha considerado el mismo: 0,001 por metro de material saturado. Cuando pasan a condiciones no confinadas (S_y), varía entre 0,001 en los menos capacitivos y 0,08 en los más capacitivos.

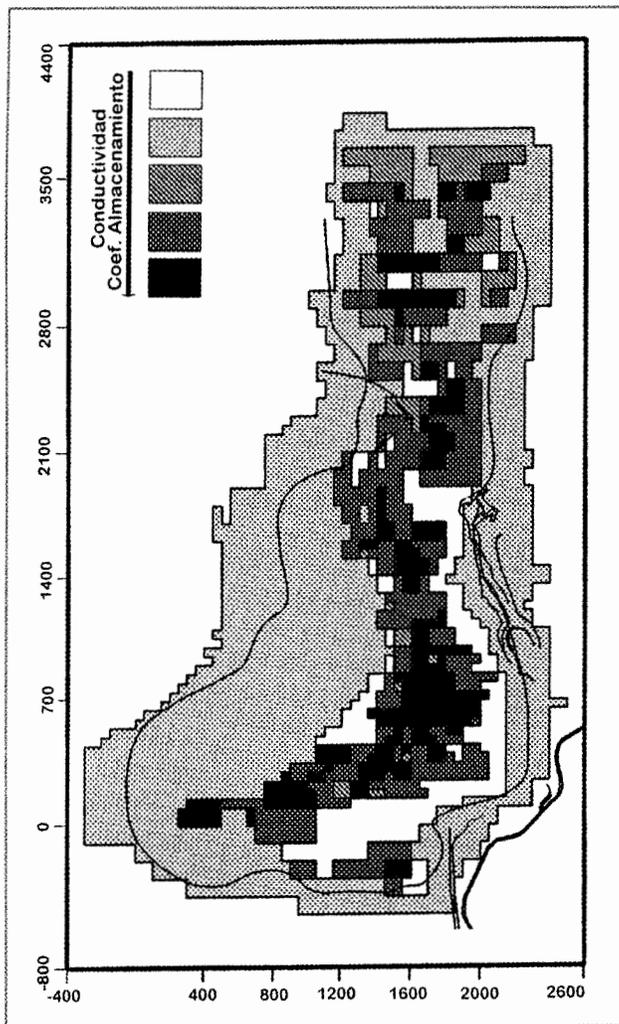


Figura 6. Zonación definida para la conductividad hidráulica y el almacenamiento.

almacenamiento variable. De esta forma, MODFLOW evalúa automáticamente, para cada iteración de cálculo, el grado de confinamiento que le corresponde a cada celda, dependiendo del nivel piezométrico que presente y de su cota de muro.

El grado de rehumedecimiento por ascenso capilar de agua, se estimó en 0,1 m.

En ambos modelos, el medio fue considerado isotrópico según los ejes X e Y, mientras que según el eje Z se simuló una reducción en los parámetros hidrodinámicos.

Recarga y descarga del acuífero

La principal recarga actual del sistema, una vez alterada la red hidrográfica original, se debe a la lluvia directa producida sobre el sector modelizado y a la escorrentía superficial colectada en el fondo de la mina.

La recarga por lluvias introducida en el modelo preliminar, se calculó en base a la lluvia anual media, registrada durante el período 1982-1995 (1.862 mm/año) y la precipitación anual registrada en 1995 (1.802 mm/año).

En el modelo detallado, de acuerdo con la discretiza-

PERÍODO	INTERVALO	DURACIÓN (días)	PLUVIOMETRÍA (mm/período)	LLUVIA EQUI. (mm/año)
PRIMERO	01/Jun/95-01/Sep/95	92	19,5	77,4
SEGUNDO	01/Sep/95-01/Jun/96	274	1.717,8	2.288,3
TERCERO	01/Jun/96-01/Sep/96	92	9,6	38,1
CUARTO	01/Sep/96-01/Jun/97	273	1.944,8	2.600,2
QUINTO	01/Jun/97-01/Oct/97	122	34,8	104,1

Tabla 3. Pluviometría registrada durante cada período modelizado.

TIPO MATERIAL	CONDUCTIVIDAD		ALMACENAMIENTO	
	$K_x=K_y$ (m/día)	K_z (m/día)	S_s (1/m)	S_y
IMPERMEABLE	0,001	0,00025	0,001	0,001
SEMIPERMEABLE	0,4	0,4	0,001	0,038
PERMEABLE	0,7	0,35	0,001	0,06
ALTA PERMEAB.	0,75	0,35	0,001	0,07
MUY ALTA PERMEAB.	0,8	0,4	0,001	0,08

Tabla 2. Parámetros hidrodinámicos introducidos en el modelo preliminar.

La modificación de los valores asignados a los parámetros hidrodinámicos, ha resultado fundamental durante el período de calibración del modelo.

Dado que el perímetro de todo el área modelizado está compuesto por materiales impermeables, se definieron condiciones de contorno de flujo nulo en los límites.

Naturaleza de las capas

Todas las capas se han modelizado como Confinada/No-confinada con transmisividad y coeficiente de

ción temporal, y en función de las precipitaciones registradas, ha podido calcularse la recarga por lluvias producida durante cada período, de forma que se considera igual precipitación en todo el sector modelizado, definiendo la recarga sobre la superficie topográfica.

Apenas se registran lluvias durante la época seca (junio-agosto), frente a las fuertes precipitaciones medidas durante los períodos más húmedos. En 1997, se prolongó el estiaje hasta finales de septiembre (mes excepcionalmente seco), incluso durante noviembre apenas se registraron lluvias. La distribución de los períodos lluviosos es más irregular, si bien durante enero-abril se han llegado a superar los 500 mm mensuales.

En el modelo preliminar, se definió una **condición de contorno a nivel forzado** (GHB: General-Head Boundary), que unía el sector Sur de la mina N4E con el acuífero N5, definiendo un nivel piezométrico de 651 m s.n.m. Esta condición se asignó en base a las líneas de fractura que se localizaron entre ambos acuíferos, observándose una laguna intermedia, que mantenía el nivel de agua.

Durante el desarrollo del modelo detallado, tras analizar las evoluciones piezométricas en ambos acuíferos, se suprimió

esta condición de contorno, comprobando, durante la calibración, una mejor aproximación de los niveles de agua medidos, con los aportados por el modelo.

Parte del agua acumulada en superficie y en la franja no saturada, retorna a la atmósfera en forma de evaporación, de acuerdo con las condiciones meteorológicas (temperatura, velocidad del viento, insolación, etc.) y ambientales (orografía, naturaleza del terreno, cobertera vegetal, etc.). Se trata de la única descarga no controlada conocida del sistema, ya que los caudales extraídos desde los bombeos, pueden ser modificados a voluntad.

Para el cálculo de la evapotranspiración real, se ha tenido en cuenta, fundamentalmente, la lluvia producida durante cada período y el grado de cobertera vegetal existente. Dado que el área en estudio es una explotación minera a cielo abierto, y no existe apenas vegetación en el interior del área modelizada, consideramos nulo el efecto de transpiración vegetal.

PERÍODO	INTERVALO	DURACIÓN (días)	PLUVIOMETRÍA (mm/período)	LLUVIA EQUI. (mm/año)
PRIMERO	01/Jun/95-01/Sep/95	92	526,2	2.087,6
SEGUNDO	01/Sep/95-01/Jun/96	274	724,2	964,7
TERCERO	01/Jun/96-01/Sep/96	92	671,3	2.663,3
CUARTO	01/Sep/96-01/Jun/97	273	694,9*	929,1
QUINTO	01/Jun/97-01/Oct/97	122	661,3	1.978,5

*Valor estimado

Tabla 4. Pluviometría registrada durante cada período modelizado.

La evaporación potencial media anual, registrada entre 1989-1995, fue de 1.160 mm/año. En el *modelo preliminar* se había supuesto una evaporación de 529 mm/año.

La evapotranspiración afecta a la humedad retenida en los primeros metros del terreno, reduciéndose el efecto con la profundidad hasta alcanzar una profundidad de efecto nulo. Esta profundidad se ha supuesto en el *modelo detallado* de 5 m.

Sondeos de drenaje

Los caudales drenados desde cada sondeo, al no disponer de caudalímetros, han sido estimados en base al número de horas de funcionamiento, tipo y rendimiento de las bombas instaladas.

Teniendo en cuenta el cronograma de funcionamiento, los caudales extraídos desde cada sondeo y la discretización temporal (5 períodos en el *modelo detallado*), se han definido los caudales medios equivalentes, extraídos desde cada punto, durante cada período simulado.

En total se han realizado drenajes desde 25 sondeos de superficie y 3 sondeos de conexión con la galería, variando el caudal total extraído entre 26.400-39.614 m³/día.

La mayor concentración de sondeos se produce en el sector central de la mina (Masa Centro). Los sondeos de drenaje se han simulado suponiéndolos filtrantes en toda su longitud, al ajustarse los tramos de filtro y ciegos con los límites entre capas.

Piezómetros de calibración

Teniendo en cuenta la discretización temporal realizada, se han podido emplear los registros de nivel de agua obtenidos en 23 piezómetros, de los cuales, 4 han permanecido activos durante todo el tiempo simulado.

Los niveles de agua registrados, al final del primer período modelizado (01/Sep/95), carecen de interés, dado que el modelo apenas tiene tiempo para estabilizar sus niveles en los 92 días que dura el primer período.

La evolución de niveles de agua, suele corresponderse con los períodos de lluvias (segundo o cuarto período) y estiaje (tercer y quinto período), excepto en aquellos puntos donde es más evidente el efecto del drenaje minero.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MODELIZACIÓN

Al definir la evolución del tiempo en régimen transitorio, cuando se desee simular diferentes alternativas de drenaje, pueden añadirse nuevos períodos al *modelo detallado*, sin necesidad de realizar cambios en la definición paramétrica.

En el momento de finalizar este artículo, la calibración del *modelo detallado* aun no ha sido terminada, basando su ajuste en los siguientes registros:

- niveles de agua calculados para 23 piezómetros de calibración con los datos registrados, durante los períodos 2, 3, 4 y 5, y
- caudales extraídos desde cada sondeo de drenaje, durante los períodos 2, 3, 4 y 5.

No se empleó el primer período en la calibración ya que, al tratarse de un régimen transitorio y ser tan corto dicho período (91 días), el modelo requiere más tiempo para estabilizar sus niveles, y acomodarse a una evolución equilibrada con las condiciones y características definidas.

La calibración de niveles de agua, período a período, presenta un error medio inferior al 2 %, mientras que el ajuste entre los caudales registrados y simulados, difiere en menos de un 6 % del total. Aun cuando dicha calibración será mejorada en los próximos meses, el análisis de la evolución de niveles de agua y direcciones de flujo, permite extraer las siguientes conclusiones.

Los diques que compartimentan el yacimiento N4E, condicionan el drenaje de cada sector según tres masas:

- La mayor constituye el grueso del yacimiento, centrándose en las Masas Centro y Sur, donde se alcanzan las cotas más bajas del mineral. Éste es el área donde se ha intensificado más el drenaje, con la instalación del 95 % de los sondeos. El modelo indica la existencia de un fuerte gradiente hidráulico en los taludes Este y Sur que no quedan completamente drenados, y presentan problemas de estabilidad, por lo que se recomienda instalar, en ellos, drenes subhorizontales.
- La segunda masa, inmediatamente al Norte de la principal, se centra en la Masa Centro-Norte. Presenta un

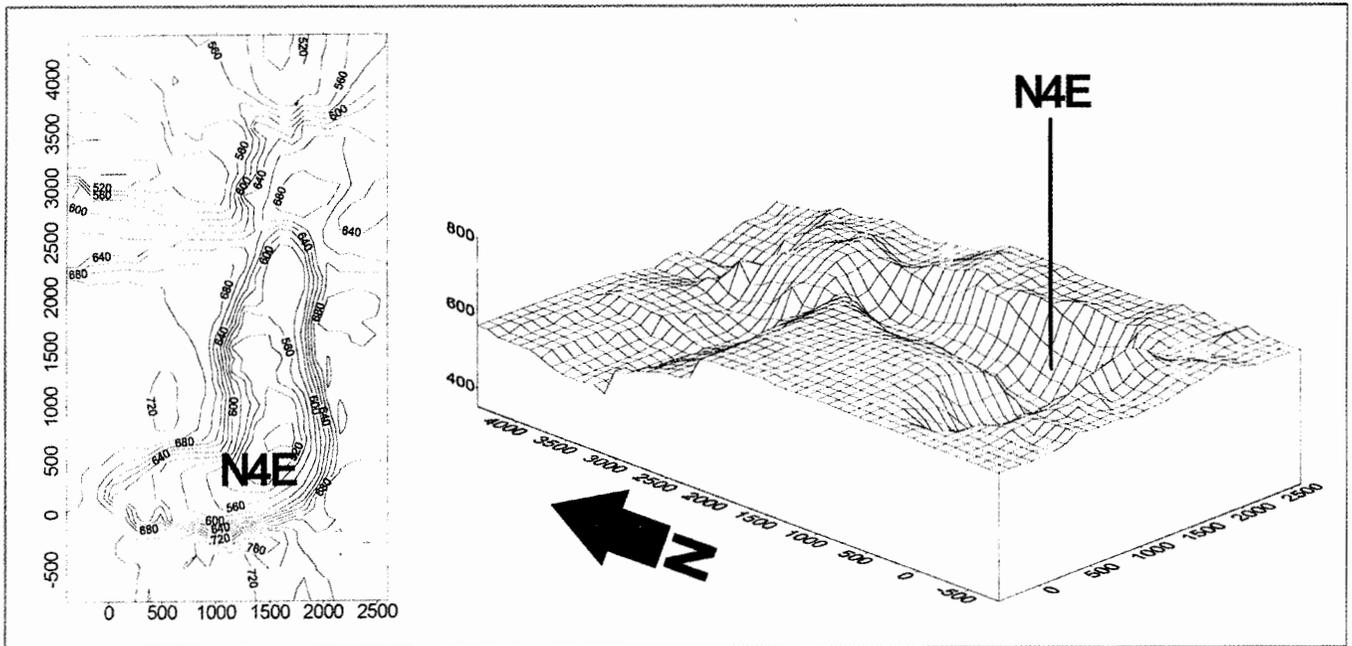


Figura 7. Piezometría final alcanzada en el modelo detallado (octubre/1997).

conjunto de diques que la mantuvo hidrogeológicamente aislada, hasta que las labores mineras la conectaron con el resto de la explotación. En este sector, sólo existe un sondeo de drenaje.

- La tercera masa, de menor extensión y espesor que las anteriores, se encuentra bajo la Masa Norte. Presenta numerosos diques que la subdividen en pequeños bloques hidrogeológicamente aislados. No cuenta con ningún sondeo de drenaje, realizándose éste a través de las conexiones creadas con la segunda masa o a través de su descarga natural hacia el Norte.

El drenaje ha conseguido abatir el nivel de agua bajo la cota 490 m s.n.m. La rapidez del drenaje se pone de manifiesto al lograr una depresión superior a 40 m entre junio de 1995 y octubre de 1997.

Por término general, el nivel de agua se mantiene muy próximo al fondo de mina. No es preciso realizar el drenaje de la Masa Norte, al quedar desaguada mediante los sondeos ubicados en la Masa Centro.

El conoide de drenaje producido apenas afecta al entorno a la mina, debido al carácter impermeable del material circundante a la explotación.

Los flujos de agua subterránea entrantes en la mina, provienen, fundamentalmente, del Sur y Este, donde, los niveles de agua se encuentran más elevados.

La simulación presenta numerosos celdas secas en las tres primeras capas (concentradas en las Masas Centro, Centro-Norte y Sur), debido a la depresión piezométrica producida desde abril de 1995, momento al que corresponde la superficie topográfica introducida en el modelo.

Tras analizar los resultados obtenidos mediante el *modelo detallado*, y comparando los descensos de nivel producidos por sondeos y drenajes de interior, se deduce que es conveniente realizar una serie de sondeos subhorizontales desde la galería de desagüe, lo que permitiría reducir el costo operativo de drenaje. A este respecto, se está analizando la viabilidad

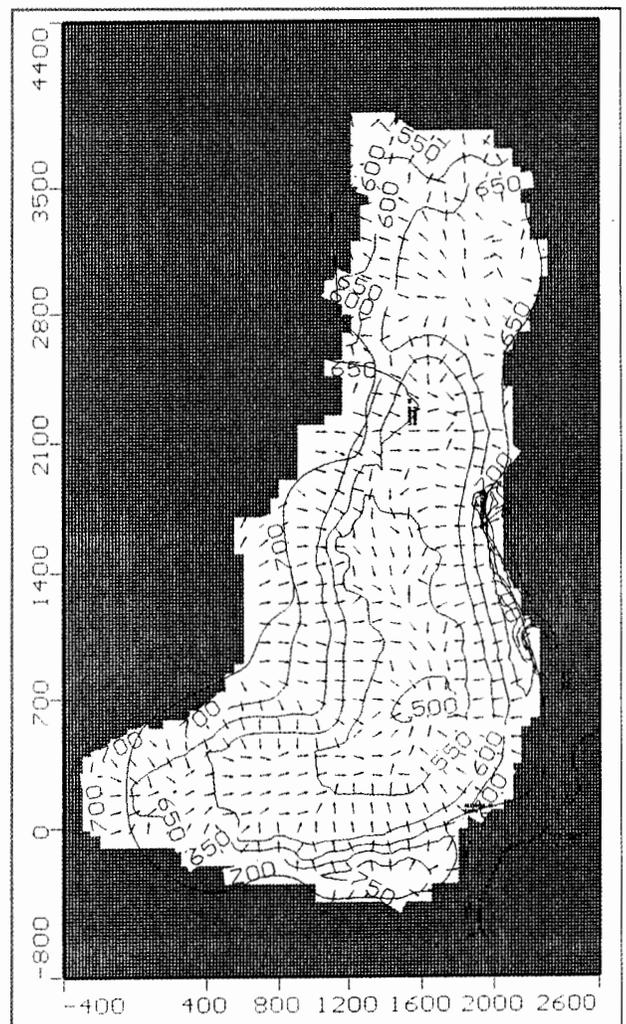


Figura 8. Direcciones de flujo de agua subterránea (quinto período).

técnica de realización de estos sondeos, cuyo mayor problema constructivo deriva de las características geotécnicas de los materiales a atravesar, que pueden ser fácilmente arrastrados por el flujo de agua drenada.