

MEDIDAS DE MANEJO PROPUESTAS EN EL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO



Cerrejón

Carbón para el mundo,
Progreso para Colombia

**Departamento Técnico
Carbones del Cerrejón Limited
Febrero 2010**

1. MEDIDAS DE MANEJO PROPUESTAS EN EL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

Como se mencionó en el informe pasado, Cerrejón implementa medidas de manejo para evitar, mitigar, compensar, estudiar y hacerle seguimiento a los impactos que se puedan producir sobre el medio ambiente o los frentes de minería, como consecuencia del corte de acuíferos durante las labores de excavación. Dichas medidas en general consisten en:

1-Construcción y monitoreo de barreras de baja permeabilidad, cuyo propósito principal es minimizar flujos de agua desde los acuíferos intervenidos y evitar la potencial degradación de la calidad del agua de dichos acuíferos.

2-Construcción y monitoreo de pozos de bombeo y drenes horizontales, cuyo propósito principal es garantizar la estabilidad de las paredes de la mina.

3-Construcción de zanjas corta flujos y sumideros, cuyos propósitos principales son interceptar flujos y almacenar las aguas subterráneas para su futura disposición.

4- Monitoreo de los niveles piezométricos, monitoreo de la calidad del agua subterránea, medición de los caudales de bombeo y el seguimiento al funcionamiento de las barreras de baja permeabilidad.

5-Mejoramiento del modelo hidrogeológico del Cerrejón.

6-Characterización de acuíferos.

2. AVANCE DURANTE EL 2.009 EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MANEJO.

A continuación se presentan las principales medidas implementadas durante el año 2.009.

2.1. Construcción y monitoreo de barreras de baja permeabilidad: en el capítulo denominado “BARRERAS DE BAJA PERMEABILIDAD-INFORME AÑO 2009”, se presentan los resultados del monitoreo de dichas estructuras durante en año 2009 y los planes de construcción para el 2010

Durante el año 2009 se realizó el diseño de la barrera No 2 del Tajo Patilla y hacia finales de dicho año se firmó el contrato de construcción que se realizará en los 8 primeros meses del 2010. También se comenzó el lavado y reconstrucción de algunos de los piezómetros del monitoreo de las barreras.

En el informe “BARRERAS DE BAJA PERMEABILIDAD-INFORME AÑO 2009”, se presentan algunas de las características de diseño de dicha barrera y un plano con su localización. A continuación se presenta un resumen las características principales:

- Longitud estimada: 1.198 m.
- Área estimada: 18.012 m²
- Ancho: 1 m.
- Profundidad máxima estimada: 18.8 m (Desde corte de plataforma, hasta 1.5 m de empotramiento en formación).

2.2. Construcción y monitoreo de pozos de bombeo y drenes horizontales: En el capítulo denominado "REPORTE DE MANEJO DE ACUÍFEROS – AÑO 2009 - DESPRESURIZACIÓN DE TAJOS", se presentan las principales características de los pozos construidos durante el año 2.009, los resultados de su monitoreo y los planes futuros. En el cuadro siguiente se presenta un resumen de lo realizado durante el 2.009.

INSTALACIÓN	PLANEADO		EJECUTADO		% CUMPLIMIENTO DEL PLAN	
	No.	m	No.	m	No.	m
POZOS DE BOMBEO	12,00	1680,00	13,00	1703,00	108%	101%
DRENES HORIZONTALES	64,00	8225,00	63,00	8105,00	98%	99%

A su vez fueron desmantelados 8 pozos principalmente por avances de minería o construcción de infraestructura. Así, al final del año 2.009 se tenían instalados 69 pozos, 57 de los cuales estaban operando.

A los pozos operativos se les hizo monitoreo a sus caudales de bombeo y a su estructura física. A continuación se muestra un cuadro resumen del plan de bombeo contra lo alcanzado en el 2.009:

DESCRIPCIÓN	PLANEADO	REAL	% CUMPLIMIENTO
VOLUMEN (m3)	2.815.000	3.028.187	107.56%
POZOS OPERANDO	59	60	98.6%

2.3. Construcción de zanjas corta flujos y sumideros: Durante el 2.009 no se construyeron zanjas corta flujos. Tampoco sumideros con el objetivo de controlar las aguas subterráneas.

2.4. Monitoreo de los niveles piezométricos:

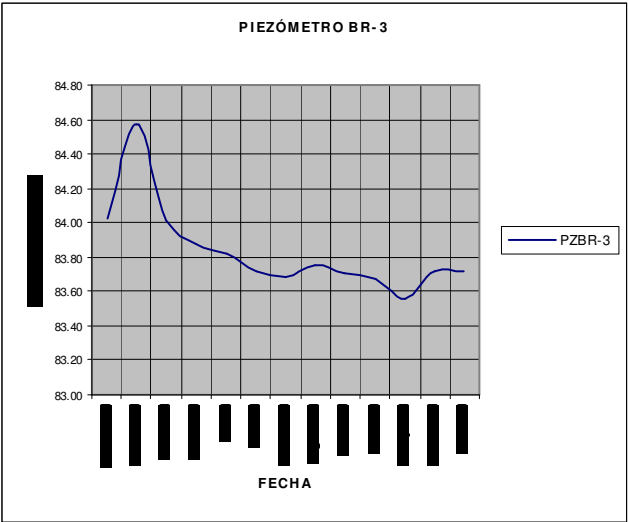
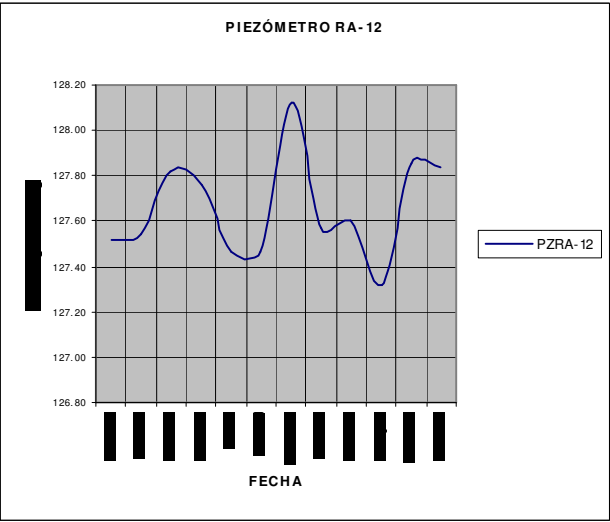
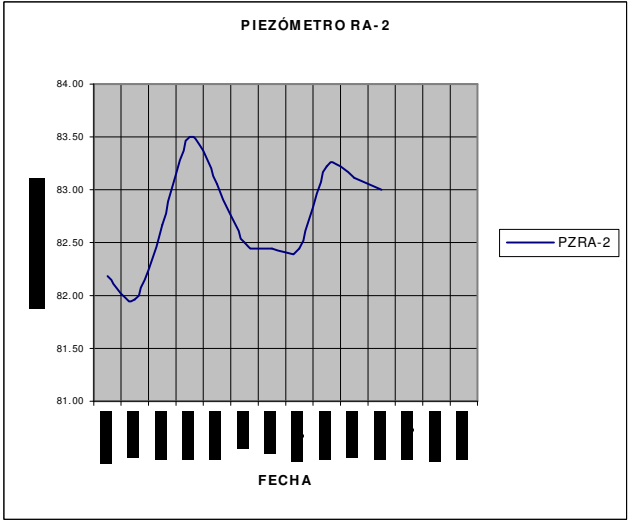
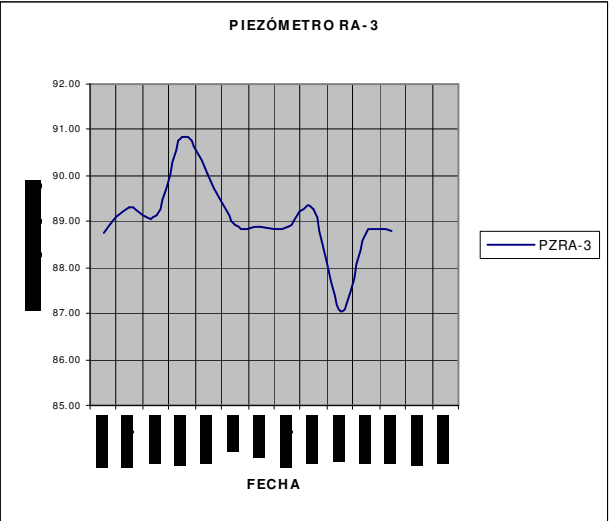
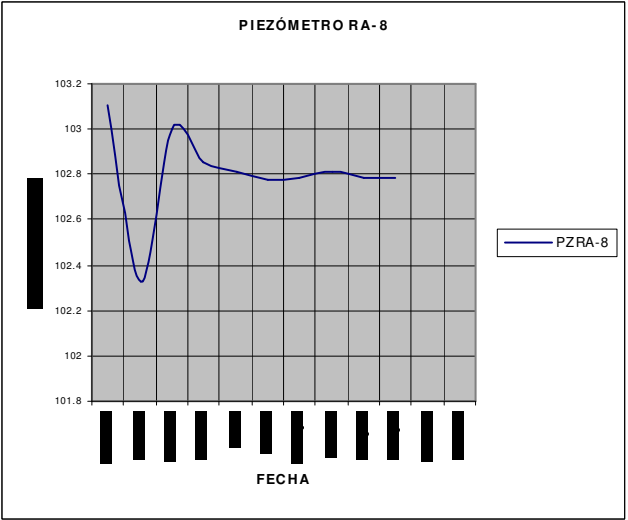
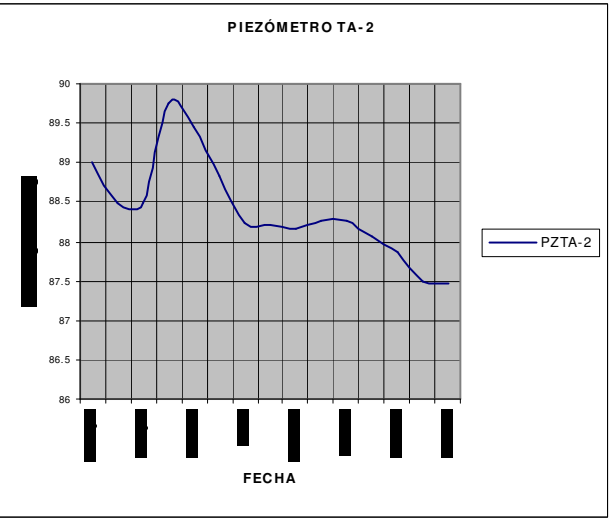
Durante el año 2.009 se monitorearon los piezómetros que se construyeron durante el 2.008.

El monitoreo de los niveles piezométricos se está haciendo tanto por medio manual, como por medidores electrónicos automáticos (divers).

En la siguiente tabla se presentan los registros de los niveles piezométricos máximos, mínimos y medios, leídos manualmente, entre mayo de 2008 y Diciembre de 2009, en seis piezómetros ubicados en los acuíferos aluviales de la zona.

PIEZÓMETRO	Nivel Medio (m.s.n.m)	Nivel Máximo (m.s.n.m)	Nivel Mínimo (m.s.n.m)	Variación de Nivel (m)
BR-3	83.83	84.57	83.56	1.01
RA-12	127.66	128.12	127.32	0.80
RA-2	82.74	83.51	81.97	1.54
RA-3	89.05	90.86	87.04	3.83
RA-8	102.81	103.11	102.33	0.78
TA-2	88.40	89.75	87.47	2.27

En las gráficas siguientes se presentan los registros de los niveles piezométricos medidos manualmente.

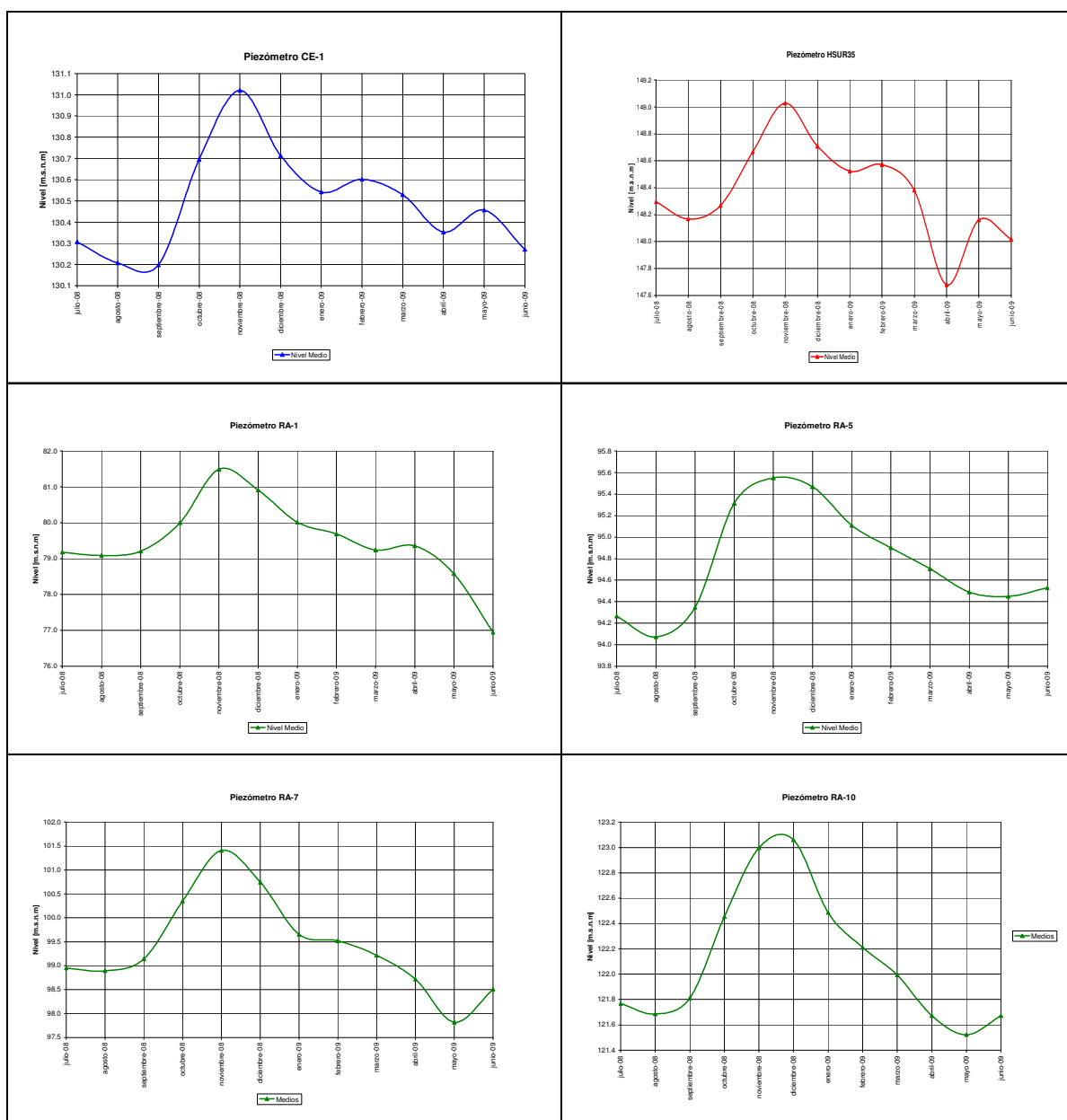


En la siguiente tabla se presentan los registros de los niveles piezométricos máximos, mínimos y medios, leídos por transductores de presión (divers) entre

Mayo de 2008 y Agosto de 2009, en ocho piezómetros ubicados en los acuíferos aluviales de la zona.

Piezómetro	Nivel Medio (msnm)	Nivel Máximo (msnm)	Nivel Mínimo (msnm)	Variación de Nivel (m)
CE-1	130.42	132.23	129.74	2.49
CE-2	109.74	112.42	109.34	3.08
HSUR	148.23	151.03	146.46	4.56
RA-1	79.18	82.59	76.14	6.46
RA-5	94.65	96.20	93.82	2.39
RA-7	99.25	102.98	95.20	7.78
RA-9	112.21	112.82	111.76	1.06
RA-10	121.94	123.73	120.53	3.20

En las gráficas siguientes se presentan los registros de los niveles piezométricos medios con transductores de presión.



Los niveles piezométricos máximos se presentan entre octubre y noviembre del 2.008, lo que corresponde con los caudales medios máximos que se presentan en las corrientes superficiales de la zona. Por otra parte, aunque los caudales mínimos se registran en el mes de marzo del 2.009, este periodo no corresponde con la época de niveles piezométricos mínimos, pues estos se presentan entre junio y julio. Esto ocurre, porque, aunque los niveles descienden considerablemente entre diciembre y marzo, los niveles alcanzados entre octubre y noviembre son lo suficientemente altos para impedir que se presenten los caudales mínimos del año en esta época.

- 2.5. **Monitoreo de la calidad del agua del acuífero.** La calidad fisicoquímica, mineralógica y bacteriológica del agua del acuífero cuaternario se viene monitoreando en cada uno de los pozos de abastecimiento. En el informe “APROVECHAMIENTO DEL ACUÍFERO CUATERNARIO DEL RÍO RANCHERÍA”, se consignan los resultados de dicho monitoreo.
- 2.6. **Mejoramiento del modelo hidrogeológico del Cerrejón:** Durante el segundo semestre del año 2.009, la compañía Hidrogeocol Ltda. elaboró el modelo hidrogeológico de flujos entre el sector de Carretalito y Cuestecitas.

El estudio hidrogeológico, que incluye la elaboración de mapas geológico e hidrogeológico y de los modelos conceptuales y numéricos. Se basó en la recopilación y análisis de la información geológica, hidrológica, geotécnica, de impacto ambiental e hidrogeológico que incluye geoeléctrica, hidrogeoquímica e hidráulica de pozos. Además, se recopiló toda la información disponible referente a los modelos numéricos desarrollados con anterioridad y los estudios desarrollados para cada uno de los tajos mineros.

Con base en lo anterior, se procedió a evaluar la información para elaborar los Modelos Hidrogeológicos Conceptual y Numérico.

A partir del análisis del medio hidrogeológico y de su estructura, como también de los resultados del modelo numérico, se determinan los impactos generados por la minería en las aguas subterráneas y las alternativas para mitigarlos.

HIDROLOGÍA:

Parámetros Climatológicos

Con base en los registros de la estación La Mina y de acuerdo a INGETEC S.A. (2006), los parámetros climatológicos de la zona presentan una variación poco significativa.

- La humedad relativa promedio multianual es de 73% con variación aproximada al régimen de precipitación, presentando un valor mínimo de 67% en junio y un máximo de 80% en octubre y noviembre.

- Según los registros de brillo solar de la estación La Mina, ubicada en la zona de la mina a una altura aproximada de 80 msnm, el total anual de horas de sol es de 2619 horas.
- La temperatura media es de 28.5 °C, con un máximo promedio de 30.0 °C en agosto y un mínimo promedio de 27.2 °C en diciembre.
- El promedio total anual multianual de evaporación, para la estación La Mina, es de 2244 mm, el promedio mensual es de 177mm, con un máximo de 230 mm en marzo y un mínimo de 148 mm en noviembre. Se debe resaltar que la evaporación de referencia es la medida en el evaporímetro tanque Clase A.

Precipitación

Según Hidrogeocol Ltda., (2008), la precipitación media multianual en las estaciones La Paulina, Campamento Intercor y La Mina es de 825.2, 1088.9 y 832.6 mm/año respectivamente, con un régimen bimodal que muestra períodos más húmedos en los meses de abril a octubre, y períodos de baja precipitación en los meses de diciembre a marzo.

Evaporación

En el sector del valle del Río Ranchería desde Carretalito hasta Cuestecita, se presentan valores superiores a los 2000 mm/año.

Evapotranspiración Potencial

De acuerdo a Hidrogeocol Ltda., (2008) los valores estimados de evapotranspiración potencial para las estaciones La Paulina, Campamento Interior y La Mina son de 1849, 1734 y 1938 mm/año, respectivamente.

Infiltración de Agua Lluvia

De acuerdo a INGETEC S.A. (2006), la recarga subterránea hacia los aluviones por efecto de la precipitación es mínima debido a que la capacidad de retención de los suelos es mayor que la infiltración y por lo tanto el agua es retenida en la matriz de suelo sin llegar a estratos más profundos. Para la zona de estudio, el potencial de retención del suelo es del orden de 200 mm aproximadamente, correspondiente a suelos de matriz arcillosa.

Sin embargo, la recarga subterránea puede ocurrir cuando se presenten días seguidos con lluvias, ya que el suelo se satura y parte del agua pasa por

percolación hacia los aluviones; y en lugares donde se presentan afloramientos superficiales de materiales granulares como gravas o arenas, donde el potencial de retención es del orden de 80 mm, y parte del agua infiltrada pasa a recargar los aluviones.

Infiltración de Agua Superficial

En el área de estudio se presentan muchas corrientes superficiales con hidrologías intermitentes. Este fenómeno es poco frecuente en el Río Ranchería y se presenta con mayor periodicidad en los arroyos afluentes al mismo.

Según INGETEC S.A. (2006), en términos hidrogeológicos el Río Ranchería interactúa de manera permanente con el acuífero que le subyace, intercambiando caudales en dirección río-acuífero y acuífero-río, a lo largo de su cauce y en toda época del año.

Corrientes Superficiales como Fuente de Recarga

La principal fuente de recarga son las corrientes superficiales que en algunos sectores de su cauce recargan los acuíferos cuaternarios, principalmente durante los periodos de lluvia.

Según Hidrogeocol, la infiltración natural a partir de las corrientes superficiales, resultó ser de 711.2 l/s. Considerando un área total de cuaternarios de 208 Km², se obtiene una recarga media anual a partir de los cauces superficiales de 107.8 mm/año.

Hidrografía

La información que reportan las estaciones de la cuenca media del Ranchería, indica un régimen hidrológico bimodal con los meses húmedos alrededor de mayo-junio y septiembre a diciembre, siendo el último periodo el más pronunciado. De acuerdo a los registros de las estaciones, el caudal medio mensual multianual varía entre 8.65 m³/s en la estación Abajo Bocatoma y 11.82 m³/s en la Estación Cuestecitas. El caudal mínimo mensual multianual varía entre las estaciones Abajo Bocatoma y Cuestecitas, entre 2.30 m³/s y 4.18 m³/s.

GEOLOGÍA

Estratigrafía

El Complejo Carbonífero El Cerrejón, se ubica en el extremo nororiental de Colombia, en la subcuenca media del Río Ranchería. En esta subcuenca afloran gran variedad de unidades litoestratigráficas, cuyas edades abarcan desde el pre

Cretáceo hasta el Cuaternario y comprenden diferentes tipos de rocas, distribuidas entre dos elevaciones laterales que corresponden a las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá.

Las rocas más antiguas están representadas por la Formación Girón de edad Jurásica.

Las rocas sedimentarias del Cretáceo son de origen marino y constituyen la parte más externa del valle medio; están representadas por la Formación Cogollo, las formaciones Aguas Blancas – La Luna y Molino y la Formación Hato Nuevo (Cretáceo Superior – Terciario inferior).

Las rocas Terciarias se depositaron en ambiente continental y deltaico subacuático y se presentan hacia el centro del valle, gran parte cubierta por los depósitos Cuaternarios. Están representadas por la Formación Manantial, la Formación Cerrejón que constituye el centro del valle; la unidad contiene los mantos de carbón explotables en la cuenca carbonífera, y las formaciones Tabaco y Palmito.

Los depósitos recientes formados posiblemente durante Pleistoceno – Holoceno, presentes hacia el centro del valle y con mayor extensión hacia el sur del complejo carbonífero, están representados por sedimentos polimícticos arenosos, gravosos y limosos, como resultado de la depositación aluvial y coluvial de materiales provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta y de la Serranía de Perijá; forman terrazas aluviales, abanicos estáticos y activos y llanuras aluviales y de inundación.

Tectónica

El ambiente estructural dominante en la subcuenca, está controlado por una tectónica de bloques desarrollada entre el Paleozoico y Cenozoico, donde las fallas más importantes son Oca, Cerrejón y Papayal - Río Ranchería; la zona corresponde a un monoclinal con estratos de rumbo N – NE inclinados hacia el sureste, truncados al norte por la Falla de Oca. Sus flancos corresponden a la estribación oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta en el noroccidente y a la Serranía de Perijá en el nororiente.

HIDROGEOLOGÍA

En la cuenca media del Río Ranchería se presentan cinco tipos importantes de acuíferos, identificados del más antiguo al más joven con los nombres de Cogollo y Sistema Acuífero Aguas Blancas- La Luna del Cretáceo, Cerrejón y Areniscas de Tabaco del Terciario y los correspondientes a los depósitos aluviales del Cuaternario, siendo el más importante de ellos el Acuífero Aluvial del Ranchería.

En el modelo numérico sólo se involucran aquellas unidades litoestratigráficas de interés en el desarrollo minero es decir la Formación Cerrejón, Areniscas del Tabaco

y los Depósitos Cuaternarios, situadas por encima de un primer basamento hidrogeológico constituido por la Formación Manantial de carácter impermeable.

MODELO HIDROGEOLOGICO DE FLUJO

Regionalmente el área de estudio es un monoclinal con capas inclinadas entre 5 y 45° hacia el SE, controlado por dos grandes bloques tectónicos levantados de morfología abrupta y montañosa, correspondientes a la Sierra Nevada de Santa Marta hacia el occidente y a la Serranía de Perijá al oriente. Las estribaciones de estos dos bloques separan el valle del Río Ranchería de topografía ondulada y semiplana, flanqueado hacia el Norte por el rasgo estructural conocido como Falla de Oca.

La precipitación media multianual en las estaciones La Paulina, Campamento Intercor y La Mina es de 825.2, 1088.9 y 832.6 mm/año respectivamente, con un régimen bimodal que muestra períodos más húmedos en los meses de abril a octubre, y períodos de baja precipitación en los meses de diciembre a marzo. Los resultados encontrados indican que la precipitación es insuficiente para suplir las necesidades de evapotranspiración potencial. Esto significa que la mayor parte de la precipitación se utiliza para evapotranspirar sin posibilidad de generar volúmenes de escorrentía y percolación. Esto indica que las tasas de recarga son relativamente bajas.

En el área de estudio existen varias corrientes de agua superficiales, destacándose el Río Ranchería, con un caudal medio mensual multianual que varía entre 6.82 m³/s en la estación El Cercado y 11.84 m³/s en la Estación Cuestecitas. Entre los tributarios más importantes están los ríos La Quebrada y Palomino y los arroyos Cerrejón, Tabaco y Bruno. El caudal medio multianual del Río La Quebrada es de 2.92 m³/s, con un caudal mínimo promedio multianual de 1.05 m³/s en marzo y un máximo promedio multianual de 6.44 m³/s en octubre. El caudal medio multianual estimado para el Río Palomino es de 0.86 m³/s, y el caudal medio mensual multianual de los 8 meses secos es de 0.46 m³/s. El caudal medio multianual del Arroyo Cerrejón es de 0.55 m³/s. El caudal medio multianual del arroyo Tabaco es de 0.46 m³/s y para el Arroyo Bruno el caudal medio multianual es de 0.29 m³/s.

El valle del Río Ranchería está constituido por sedimentos cuaternarios que cubren la Formación Cerrejón la cual está constituida por capas de arenisca, limolita, arcillolita y mantos de carbón, inclinadas hacia el SE. Al Este del Valle Medio del Río Ranchería aparecen areniscas y conglomerados de la Formación Arenisca de Tabaco, la Formación Cogollo y la Formación Girón. Al Oeste aparecen la Formación Manantial, la Formación Hato Nuevo y la Formación Molino.

Tanto los sedimentos Cuaternarios como la Formación Cerrejón (mantos de carbón) y Formación Areniscas de Tabaco conforman acuíferos cuya recarga proviene de la precipitación y fundamentalmente por la infiltración directa de las corrientes superficiales y constituyen los acuíferos de interés en el área de estudio.

La dirección predominante de flujo subterráneo en los acuíferos cuaternarios, bajo condiciones naturales de flujo es NE, aunque existen componentes con dirección E y W, proveniente de los flancos del valle que indican que los acuíferos cuaternarios laterales recargan los acuíferos centrales del valle entre ellos el acuífero del Río Ranchería. Por su parte, la dirección predominante del flujo subterráneo en el Acuífero Cerrejón es en dirección del rumbo de los mantos de carbón (NE) aproximadamente paralela a la dirección del río Ranchería.

Los acuíferos reciben recarga directa de las corrientes superficiales de la zona, especialmente los acuíferos cuaternarios. La recarga del acuífero Cerrejón es a través de sus mantos de carbón mediante componentes de flujos subterráneos verticales provenientes de los acuíferos aluviales Cuaternarios que le suprayacen, y en menor proporción por la precipitación en las zonas donde aflora y por las corrientes superficiales en los sitios donde estas alcanzan a cortar dichos mantos. Una menor parte por recarga de otros acuíferos terciarios como son las areniscas de Tabaco. El acuífero Areniscas de Tabaco es recargado directamente por el agua lluvia y las corrientes superficiales que lo atraviesan; éste acuífero contribuye, mediante flujos laterales, a la recarga de los acuíferos Cuaternarios Palomino y La Quebrada, los cuales a su vez recargan al Acuífero de la Formación Cerrejón.

De estos acuíferos, los de mayor uso por la comunidad son los acuíferos cuaternarios ya que presentan las mejores características hidrogeológicas que lo hacen de alto rendimiento y por ser someros pueden aprovecharse fácilmente a través de aljibes y/o pozos poco profundos. La calidad química del agua de estos acuíferos, está controlada por la lixiviación del agua a través de los sedimentos que las hacen bicarbonatadas cálcicas o sódicas, esta última por efectos de cambio de base en las intercalaciones arcillosas. Por su parte, el agua del Acuífero de la Formación Cerrejón es desde el punto de vista práctico connata, por su muy baja velocidad natural, y por lo tanto de mala calidad química por su contacto con el carbón y no tiene uso alguno por parte de la comunidad. El Acuífero Cerrejón almacena agua salobre a salada de tipo clorurada sódica - sulfatada de mala calidad físico-química para cualquier uso sin tratamiento previo, mientras que los acuíferos aluviales tienen agua salobre a dulce de tipo bicarbonatada cálcica e incrustante.

Los acuíferos Cuaternarios del área se comportan bajo condiciones naturales de flujo como acuíferos libres a semiconfinados y los acuíferos Terciarios como confinados.

El desarrollo minero implica la remoción, en el área de los tajos, de los acuíferos aluviales. La extracción de carbón de la Formación Cerrejón en conjunto modifica el comportamiento del agua subterránea en el área de influencia de los tajos. Para el desarrollo minero las unidades de interés son las formaciones Cerrejón y los Depósitos Cuaternarios. No se espera que la Formación Arenisca de Tabaco se vea afectada por la minería. Especial atención y detalle requieren los acuíferos aluviales ya que son los de mayor potencial hidrogeológico y cubren la mayor parte del área de estudio y al removerse generan los mayores impactos.

Una vez inicia la minería el drenaje de los acuíferos induce flujo de agua subterránea hacia el tajo y los acuíferos cuaternarios se comportan como acuíferos libres.

MODELO NUMÉRICO DE FLUJO

Como herramienta para evaluar el comportamiento de los acuíferos de la zona de estudio, los impactos que puede producir la minería sobre los recursos hídricos de la zona, los impactos que las corrientes superficiales y el agua subterránea pueden ocasionar sobre la minería, las medidas de mitigación de impactos necesarias para desarrollar la minería, el comportamiento de los niveles piezométricos durante la minería y el efecto que las medidas de mitigación puedan tener sobre ellos, entre otros, se empleó un modelo computacional.

En este modelo se incorporaron las principales características de los acuíferos cuaternarios y de los acuíferos de la Formación Cerrejón (Formación de interés comercial). El modelo conceptual se configuró en el programa Visual Modflow Pro Versión 2009.1 y se realizaron simulaciones para el estado estacionario, o condiciones de flujo natural, y en estado transitorio.

Condiciones Naturales de Flujo

El primer paso para determinar los impactos relacionados con el agua subterránea que puedan presentarse al cortar los acuíferos, es establecer las condiciones naturales de flujo de agua subterránea (estado estacionario). Para ello se empleó como puntos de control los niveles de 65 piezómetros perforados en la zona durante las labores de estudio de cada tajo, antes de la minería.

Dirección del Agua Subterránea

La simulación en estado estacionario indica que la dirección de flujo subterráneo en los acuíferos cuaternarios es hacia el NE, la misma dirección que tiene el Río Ranchería. El Río Ranchería recibe aporte de los tributarios que llegan de forma perpendicular a su cauce principal.

Gran parte de los aluviones del cuaternario se encuentran secos, los aluviones saturados corresponden al Río Ranchería y los sectores aledaños a los tributarios principales (Arroyo Bruno, Arroyo Tabaco, Arroyo Cerrejón, Arroyo Paladines, Río Palomino y Río La Quebrada).

Por otra parte el flujo de agua subterránea en la Formación Cerrejón se mueve en dirección al rumbo de los mantos de carbón (dirección NE).

Condiciones de Flujo con la Minería Actual

Para determinar los impactos de la minería para la vida total de la mina se realizó una simulación del área hasta el año 2009, que incluye los tajos minados hasta este año. Los resultados de esta simulación son el punto de partida para determinar los

impactos de la minería a futuro, de acuerdo al plan de 32 millones de toneladas por año definido por Carbones del Cerrejón Limited.

Simulación del Avance de la Minería hasta el año 2032

La minería en la zona se realizará hasta el año 2032. La simulación se hizo de acuerdo a los inicios y finales estimados por Cerrejón para cada uno de los tajos a partir del 2009.

IMPACTOS POR LA MINERÍA

El proceso de minería en un área determinada trae consigo alteraciones a las condiciones naturales del entorno por causa de las actividades complementarias del proceso de explotación.

Impactos sobre los Acuíferos y Corrientes Superficiales

Entre éstos se encuentran los descensos de niveles piezométricos, impactando los acuíferos y pozos cercanos y también impactan las corrientes superficiales reflejado en la disminución de los caudales.

- ***Descenso de los niveles piezométricos***

El descenso de niveles piezométricos en los acuíferos cuaternarios de la zona se limitan a las zonas aledañas a los tajos entre los tajos y las márgenes de los ríos. En la zona de los tajos E.W.P, Barrancón y Patilla los descensos ocasionados fuera del área del tajo son mínimos ya que inicialmente la zona se encuentra seca.

- ***Disminución de los caudales en las corrientes superficiales***

La simulación de impactos determina que el Río Ranchería aumenta su aporte a los acuíferos de 100.93 l/s a 117.85 l/s al final de la minería. Por otra parte la recarga que recibe el río de los acuíferos pasa de 395.15 l/s a 373.51 l/s para $t=13870$ días. Al final de la minería la disminución en la contribución al caudal del Río Ranchería es de 38.56 l/s que corresponde al 10.3 % del promedio de los caudales mínimos mensuales (siendo ésta la situación más extrema). Si comparamos esta disminución de caudal con los medios mínimos mensuales multianuales (siendo ésta la situación promedio de los mínimos mensuales) la disminución es del 1.7 %. El caudal medio mensual para la estación Bocatoma (aguas arriba del Tajo Patilla) es de 8651.17 l/s, se determina que el impacto ocasionado en el caudal del río es del 0.446% y el mínimo caudal medio mensual es 1206.33 L/s que tendría una reducción del 3.2% en el caudal en épocas secas.

Los porcentajes de reducción del caudal por causa de la minería para los demás cuerpos de agua superficial se puede observar en la siguiente tabla.

Nombre del Cauce Superficial	Disminución en la contribución al caudal (l/s)	Caudales medios y mínimos mensuales naturales de caudales (l/s)				% del caudal medio mensual al que corresponde la disminución en la contribución del caudal del río			
		Q medio mensual	Qmax medio mensual	Qmin medio mensual	Qmin mensual	Q medio mensual	Qmax medio mensual	Qmin medio mensual	Qmin mensual
Río Ranchería - Estación Abajo Bocatoma 1506717	38.56	8651.17	32259.62	1206.33	2298.00	0.446	0.120	3.196	1.678
Río Ranchería - Estación Hacienda Guamito 1506704	38.56	10899.94	46888.58	1018.00	3744.25	0.354	0.082	3.788	1.030
Río Ranchería - Estación Cuestecita 1506705	38.56	11821.66	58768.33	1154.75	4180.83	0.326	0.066	3.339	0.922
Arroyo Cerrejón - Estación Loma Linda 1506701	3.78	550.83	2059.41	41.18	73.08	0.686	0.184	9.179	5.172
Arroyo Tabaco - Estación Remedios 1506711	-	456.11	2156.69	39.68	136.92	-	-	-	-
Arroyo Bruno - Estación La Esperanza 1506706	6.82	290.96	1798.83	0.58	121.00	2.344	0.379	1169.143	5.636
Río La Quebrada	15.17	No existen datos				No existen datos			
Río Palomino	21.33								
Río Paladines	1.08								

Balance de agua

En la tabla “Balance de Agua con los Impactos Generados por el Drenaje de los Tajos”, se presenta las entradas y salidas de agua entre acuíferos-ríos y ríos-acuíferos; cuaternarios a tajos y terciarios a tajos.

Los resultados de ésta simulación indican que para Enero del 2.010 existiría una contribución de los acuíferos al Río Ranchería de 378 l/s mientras que el río aporta al acuífero 112.71 l/s. El Arroyo Tabaco recibe 5.48 l/s de los acuíferos y aporta a ellos un caudal de 16.93 l/s. Por otra parte, el arroyo Palomino contribuye en 137.48 l/s a los acuíferos de la zona y recibe de ellos un aporte de 58.16 l/s.

Los mayores aportes de los acuíferos cuaternarios a las excavaciones se presentan el Tajo Anex (3.72 L/s) y en el Tajo La Puente (17.94 L/s)

Tabla: Balance de Agua con los Impactos Generados por el Drenaje de los Tajos

Tiempo		Rio Rancheria		aluv. Rancheria		Arr. Correjón		Aluvi6n		Arr. Tabaco		Aluvi6n		Rio La Quebrada		Aluvi6n		Arr. Bruno		Aluv.		Arr. Paladines		Aluv.		Arr. Palomino		Aluv.	
		aluv. Rancheria		Rio Rancheria		Aluvi6n		Arr. Correj6n		Aluvi6n		Arr. Tabaco		Aluvi6n		Rio La Quebrada		Aluvi6n		Arr. Bruno		Aluv.		Arr. Paladines		Aluv.		Arr. Palomino	
Fecha	dias	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s
Estacionario		8720.50	100.93	3411.00	395.15	15087.00	174.62	3428.50	39.68	1495.10	17.30	373.79	4.33	2193.03	253.85	22658.00	262.25	1769.40	20.48	1812.70	20.98	987.22	11.43	137.50	1.59	11459.00	132.63	5977.90	69.19
ene-10	5475	9738.00	112.71	3242.00	378.70	15133.00	175.15	3425.50	39.65	1465.26	16.93	473.68	5.48	21993.20	254.55	22597.00	261.54	3568.00	41.30	877.08	10.15	1036.70	12.00	126.84	1.47	11878.00	137.48	5025.40	58.16
ene-13	6570	9710.90	112.39	33048.00	382.50	15077.00	174.50	3430.00	39.70	1461.30	16.91	486.69	5.63	22038.00	255.07	22567.00	261.19	1893.20	21.91	73.09	0.85	1033.90	11.97	126.61	1.47	11814.00	136.74	4871.20	56.38
ene-14	6935	9866.60	114.20	32863.00	380.36	15101.00	174.78	3427.40	39.67	1465.90	16.97	487.50	5.64	22038.00	255.08	22566.00	261.18	625.62	7.24	90.49	1.05	1037.00	12.00	125.41	1.47	11811.00	136.70	4873.00	56.40
ene-19	8760	10232.00	118.43	33271.00	385.08	15393.00	178.16	3417.60	39.56	1487.20	17.21	482.79	5.59	22359.00	258.77	22418.00	259.47	626.69	7.25	84.28	0.98	1049.50	12.15	118.84	1.38	11946.00	138.26	4774.00	55.25
ene-24	10585	10392.00	120.28	32232.00	373.06	15372.00	177.92	3417.80	39.56	1495.50	17.36	479.20	5.55	22759.00	263.41	22322.00	257.31	627.19	7.26	81.68	0.95	1053.20	12.19	115.67	1.34	12014.00	139.05	4727.10	54.71
ene-29	12410	10456.00	121.02	32170.00	372.34	15400.00	178.24	3416.40	39.54	1505.60	17.43	477.06	5.52	22825.00	264.18	22198.00	256.92	626.73	7.25	80.30	0.93	1055.50	12.22	114.15	1.32	12033.00	139.27	4714.00	54.56
ene-32	13505	10229.00	118.39	32246.00	373.22	15402.00	178.26	3414.20	39.52	1497.50	17.33	478.81	5.54	22802.00	263.91	22208.00	257.04	625.25	7.24	79.75	0.92	1056.60	12.23	113.57	1.31	12037.00	139.32	4712.10	54.54
ene-33	13870	10182.00	117.85	32271.00	373.51	15400.00	178.24	3414.50	39.52	1494.80	17.30	479.50	5.55	22796.00	263.84	22210.00	257.06	625.20	7.24	79.60	0.92	1056.60	12.23	113.48	1.31	12036.00	139.31	4712.20	54.54
ZONA DE BALANCE		2				5				4				8				3				6				7			

BALANCE GENERAL ESTACIONARIO

Entrada de Ríos	68529.39 m ³ /d	793.2	l/s
Salidas de Ríos	61451.22 m ³ /d	711.2	l/s

IMPACTOS GENERADOS

Disminución en la contribución al Caudal del Río Ranchería	(117.85-100.93-373.51+395.15)	38.56 /s
Disminución en la contribución al Caudal del Arroyo Correjón	(178.24-174.62-39.52+39.68)	3.78 /s
Disminución en la contribución al Caudal del Arroyo Tabaco	(17.30-17.30-5.55+4.33)	-1.23 /s
Disminución en la contribución al Caudal del Arroyo La Quebrada	(263.84-253.85-257.06+262.25)	15.17 /s
Disminución en la contribución al Caudal del Arroyo Bruno	(7.24-20.48-0.92+20.98)	6.82 /s
Disminución en la contribución al Caudal del Arroyo Paladines	(12.23-11.43-1.31+1.59)	1.08 /s
Disminución en la contribución al Caudal del Arroyo Palomino	(139.31-132.63-54.54+69.19)	21.33 /s

Nota: I = Entrada

Tiempo		1 al T. La Puente por cuatern.		1 al T. Tabaco por cuatern.		1 al T. Annex por cuatern.		1 al T. BWP por cuatern.		1 al T. Patilla por cuatern.		1 al T. Correj.Cen por cuatern.		1 al T. Barranco por cuatern.		Total 1 a tajos por cuatern.		1 al T. La Puente por F. Correjón		1 al T. Tabaco por F. Correjón		1 al T. Annex por F. Correjón		1 al T. BWP por F. Correjón		1 al T. Patilla por F. Correjón		1 al T. Correj. Cen por F. Correjón		1 al T. Barranco por F. Correjón		Total 1 a tajos por F. Correjón	
Fecha	días	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s
Estacionario		24.15	0.28	300.00	3.47	328.69	3.80	0.62	0.01	0.14	0.00	2.14	0.02	42.01	0.49	697.74	8.08	529.76	6.13	2840.46	3.25	147.75	1.71	65.96	0.76	57.69	0.67	530.94	6.15	197.21	2.28	1809.77	20.95
ene-10	5475	2.17	0.03	0.00	0.00	320.96	3.71	0.00	0.00	0.00	0.00	91.37	1.06	50.49	0.58	465.00	5.38	6739.20	78.00	2748.40	31.81	154.30	1.79	4900.60	56.72	1101.60	12.75	4778.70	55.31	335.53	3.88	2078.33	240.26
ene-13	6570	1549.61	17.94	0.00	0.00	321.08	3.72	46.76	0.54	0.00	0.00	31.51	0.36	69.78	0.81	2018.74	23.37	3677.30	42.56	2609.10	30.20	172.09	1.99	4138.50	47.90	774.90	8.97	5884.60	68.11	408.52	4.73	17665.01	204.46
ene-14	6935	100.11	1.16	0.00	0.00	321.50	3.72	46.38	0.54	0.00	0.00	31.15	0.36	69.95	0.81	569.09	6.59	3587.80	41.53	2791.80	32.31	173.87	2.01	3939.80	45.60	1574.60	18.22	5856.50	67.78	403.18	4.67	18327.55	212.12
ene-19	8760	90.12	1.04	0.00	0.00	300.89	3.48	45.53	0.53	0.00	0.00	46.94	0.54	30.59	0.35	514.07	5.95	3085.30	35.71	2922.90	33.83	4852.20	56.16	3212.80	37.19	889.43	10.29	6343.40	73.42	977.08	11.31	22831.11	257.91
ene-24	10585	87.24	1.01	0.00	0.00	292.18	3.38	45.23	0.52	0.00	0.00	46.81	0.54	16.97	0.20	488.43	5.65	2577.10	29.83	2936.30	33.98	13324.00	154.21	2694.50	31.19	661.46	7.56	6520.80	75.47	2184.00	25.28	30896.16	357.62
ene-29	12410	85.80	0.99	0.00	0.00	299.97	3.47	44.76	0.52	0.00	0.00	46.72	0.54	16.89	0.20	494.14	5.72	1070.16	19.74	4302.70	48.80	15970.00	184.84	2308.80	26.72	566.94	6.56	7471.10	86.47	3740.60	43.29	36065.74	417.43
ene-32	13505	84.78	0.98	0.00	0.00	300.21	3.47	44.09	0.51	0.00	0.00	46.69	0.54	16.92	0.20	492.68	5.70	2648.40	30.65	2913.80	33.72	3946.70	45.68	2710.80	31.38	533.94	6.18	8619.20	99.76	5446.60	63.04	26819.44	310.41
ene-33	13870	85.10	0.98	0.00	0.00	300.20	3.47	43.77	0.51	0.00	0.00	25.78	0.30	16.88	0.20	471.73	5.46	3000.80	34.73	2919.70	33.79	3113.20	36.03	3563.80	41.25	525.12	6.08	5764.40	66.72	6158.30	71.28	25045.32	289.88
ZONA DE BALANCE		10		11		12		13		14		15		19		22		20		23		24		25		26		30					

Tiempo		Drenes		Drenes		Drenes		Drenes		Drenes		Drenes		Drenes		Drenes		Qtot. Tajo		
		T. La Puente		T. Tabaco		T. Annex		T. E.W.P		T. Patilla		T. Correo Centro		T. Barrancón		Todos los Tajo				
Fecha	días	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	m3/d	l/s	
Estacionario		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2507.51	29.0
ene-10	5475	5714.00	66.13	2167.10	25.08	0.00	0.00	6636.90	76.82	1213.70	14.05	4240.30	49.08	0.00	0.00	19972.00	231.16	21223.33	245.6	
ene-13	6570	3824.10	44.26	1831.50	21.20	0.00	0.00	4736.20	54.82	878.10	10.16	3730.00	43.17	0.00	0.00	14999.90	173.61	19683.75	227.8	
ene-14	6935	3659.40	42.35	2264.30	26.21	0.00	0.00	4386.30	50.77	2267.30	26.24	3670.50	42.48	0.00	0.00	16247.80	188.05	18896.64	218.7	
ene-19	8760	2911.60	33.70	2454.70	28.41	5067.70	58.65	3302.00	38.22	922.62	10.68	5763.10	66.70	613.71	7.10	21035.23	243.46	22797.18	263.8	
ene-24	10585	2347.00	27.16	2818.30	32.62	13447.00	155.64	2694.70	31.19	566.13	6.55	6311.80	73.05	2097.90	24.28	30282.83	350.50	31386.59	363.2	
ene-29	12410	2013.00	23.30	3719.70	43.05	15818.00	183.08	2904.90	26.63	449.18	5.20	6820.20	78.94	3572.20	43.43	34873.18	403.62	36559.88	423.1	
ene-32	13505	3068.30	35.51	0.00	0.00	0.00	0.00	2967.60	34.35	420.97	4.87	7903.00	91.47	5246.70	60.73	19606.57	226.93	27312.12	316.1	
ene-33	13870	3770.50	43.64	0.00	0.00	0.00	0.00	6341.00	73.39	409.19	4.74	0.00	0.00	5941.70	68.77	16462.39	190.54	25517.05	295.3	
ZONA DE BALANCE		22	20	23		24		25		26		30								

Impactos sobre el Tajo de Minería

Entre estos se encuentran, el flujo de agua subterránea hacia la excavación del tajo, el aumento de la presión de poros sobre la Formación Cerrejón que incide en la estabilidad de los taludes del tajo y la generación del proceso de tubificación.

En la tabla “balance de Agua con los Impactos Generados por el Drenaje de los Tajos”, se pueden observar los cálculos de las entradas (I) de agua a los tajos, durante los diferentes años de minería, desde los cuaternarios a los tajos y desde el terciarios a los tajos.

El drenaje de los acuíferos cuaternarios inducirá un caudal entre 5.4 l/s y 23.4 l/s hacia los tajos, ya con las barreras incluidas para retener los flujos. La formación Cerrejón inducirá un caudal entre 204 l/s y 417 l/s hacia los tajos.

Impacto de Botaderos

En el proceso se producen grandes cantidades de material estéril, las cuales deben ser objeto de manejo para su almacenamiento en condiciones adecuadas de estabilidad, seguridad e integridad del entorno.

- ***Cálculos analíticos de flujos de infiltración***

En la siguiente tabla se presentan los cálculos de infiltración de los botaderos. Las áreas de los botaderos se tomaron de la cartografía del estado final de la minería al año 2034, considerándolos totalmente desarrollados. Se debe tener en cuenta que los resultados mostrados son valores máximos o condiciones extremas de flujo.

Nombre Botadero	Area (m2)	h (m)	c (día)	Q inf (m3/día)	Q inf (l/s)
La Esperanza	1160625.00	10.00	50000.00	232.13	2.69
La Estrella	16588035.00	10.00	50000.00	3317.61	38.40
Potrerito	13568525.00	10.00	50000.00	2713.71	31.41
Annex	4577645.00	10.00	50000.00	915.53	10.60
Tipiala	10130340.00	10.00	50000.00	2026.07	23.45
Palmarito	6502290.00	10.00	50000.00	1300.46	15.05
Oreganal 1	10530940.00	10.00	50000.00	2106.19	24.38
Caracolí	13283100.00	10.00	50000.00	2656.62	30.75
TOTAL				15268.30	176.72

Impacto de Embalses

Los embalses generan flujo de agua hacia los acuíferos en contacto con ellos, tanto en los localizados sobre acuíferos cuaternarios como los localizados sobre la Formación Cerrejón.

- ***Cálculos analíticos de flujos de infiltración***

En la siguiente tabla se presentan los cálculos de infiltración de los embalses. Por razones análogas al caso de botaderos, los resultados arrojan impactos máximos o condiciones extremas de flujo.

Nombre Embalse	Area (m2)	Capacidad (m3)	h media (m)	Q inf (m3/d)	Q inf (l/s)
Embalse Potrerito	925804.00	*	6.00	1110.96	12.86
Tajo 100	295221.00	*	6.00	354.27	4.10
Embalse Saman	230585.00	632659.00	2.74	126.53	1.46
Embalse No 2	182474.00	531563.00	2.91	106.31	1.23
Laguna Este	171967.00	515576.00	3.00	103.12	1.19
Embalse Cantor	113340.00	503614.00	4.44	100.72	1.17
Embalse El Muerto	107679.00	257741.00	2.39	51.55	0.60
Embalse Pit 120	105914.00	1392280.00	13.15	278.46	3.22
Laguna Fernandez	100087.00	207637.00	2.07	41.53	0.48
Laguna Oeste	84251.00	236204.00	2.80	47.24	0.55
Laguna Crs	83424.00	523340.00	6.27	104.67	1.21
Embalse El Dique	81648.00	408341.00	5.00	81.67	0.95
Palotal 1	72128.00	*	6.00	86.55	1.00
Embalse Felino	62923.00	*	6.00	75.51	0.87
Tajo 831	55590.00	*	6.00	66.71	0.77
Embalse Sur 8.3	41222.00	44939.00	1.09	8.99	0.10
Laguna Sur	41175.00	72500.00	1.76	14.50	0.17
Tajo 45	36946.00	*	4.00	29.56	0.34
Palotal 10	21787.00	*	4.00	17.43	0.20
Oreganal 1	19081.00	*	4.00	15.26	0.18
Oreganal 2	18557.00	*	4.00	14.85	0.17
Embalse Trituradora	16144.00	60250.00	3.73	12.05	0.14
Embalse Puente Oeste	8362.00	20580.00	2.46	4.12	0.05
Embalse Luruaco	8249.00	*	4.00	6.60	0.08
Embalse Clinker	4006.00	13936.00	3.48	2.79	0.03
Embalse El Cisne	976.00	*	4.00	0.78	0.01
TOTAL	2889540.00			2862.71	33.13

Impacto de Pilas de Carbón

En la siguiente se presentan los cálculos de infiltración de las pilas. Las áreas se tomaron de la cartografía del estado final de la minería al año 2034.

Nombre Pila	Area (m2)	h (m)	c (día)	Q inf (m3/día)	Q inf (l/s)
Pila E.W.P	1460260.00	5.00	6250.00	1168.21	13.52
Pila 831	70869.00	5.00	6250.00	56.70	0.66
Pila Sur	76011.00	5.00	6250.00	60.81	0.70
TOTAL				1285.71	14.88

3. ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y MEDIDAS DE MANEJO

A continuación se presentan algunas alternativas para evitar, mitigar o compensar los impactos determinados.

3.1. Mitigación de Flujos Provenientes de Acuíferos Cuaternarios

En los tajos donde se ya han desarrollado o se están desarrollando los procesos de minería, el drenaje de los acuíferos cuaternarios ya ha sido controlado, por esta razón la contribución de agua subterránea al interior de estos tajos es baja de acuerdo a los resultados de la simulación del modelo numérico.

Por otra parte, en los tajos a abrir o ampliar en el futuro, los acuíferos cuaternarios deben ser drenados o controlados, para lo cual es necesario:

- Construcción de medidas para evitar tubificación y flujos importantes hacia los Tajos, para lo cual se propone la construcción de barreras de baja permeabilidad.
- Para mitigar los flujos de agua en los sectores saturados de los aluviones que se encuentran dentro del área del tajo se recomienda la construcción de sumideros sobre el área a minar.

3.2. Drenaje de la Formación Cerrejón

Para realizar el drenaje de la Formación Cerrejón de tal forma que se garantice la estabilidad de los taludes de los tajos y para el control y manejo del agua subterránea que la minería induce a los tajos a través de la Formación, se deben instalar:

- ***Batería de pozos profundos***

Se hace la instalación de pozos profundos sobre la superficie del tajo y sobre niveles inferiores a medida que avanza la minería. Los pozos propuestos deben tener una profundidad promedio de 150m y se deben diseñar para manejar los flujos máximos de drenaje establecidos en la sección de impactos

A partir de los resultados de los impactos, se calculó el número de pozos que deben ser instalados para cada tajo. En la tabla siguiente se presentan:

TAJO	NIVEL	TOTAL POZOS	Highwall	Endwall	Caudal (l/s)
La Puente	Superficie	7	6	1	3
	-10	5	5	-	
	-70	3	3	-	
Tabaco	Superficie	7	4	3	3
	0	6	3	3	
	-80	4	2	2	
Oreganal	Superficie	15	12	3	3
	50	9	8	1	
	0	6	5	1	
	-40	5	4	1	
Annex	Superficie	11	6	5	8
	20	8	5	3	
	-20	4	4	-	
	-70	2	4	-	
Barrancon	Superficie	10	6	4	3
	60	9	6	3	
	20	6	5	1	
EWP	Superficie	10	7	3	3
	-15	6	4	2	
	-40	3	3	-	
	-120	1	1	-	
Patilla	Superficie	5	3	2	3
	-15	4	3	1	

- ***Drenes Horizontales***

Debido a que la eficiencia de los pozos no es del 100%, es de esperarse remanentes de flujo, especialmente en los sectores del footwall de los tajos, que no puede extraerse con los pozos profundos. Como complemento de estos, se instalan drenes horizontales sobre el footwall para drenar estas áreas.

- ***Sumideros y Zanjas recolectoras***

Como mecanismos complementarios para el drenaje de la Formación Cerrejón se construyen sumideros dentro del área de los tajos que facilite desaguar la Formación. A estos sumideros llega también el agua de escorrentía que ha entrado en contacto con la Formación.

En la tabla siguiente se presentan los resultados de la modelación de las medidas de mitigación para el drenaje de la Formación Cerrejón. Este modelo incluyó la batería de pozos profundos y los drenes horizontales del footwall. El caudal remanente será capturado por los sumideros y las zanjas recolectoras.

Tiempo		Tajo La Puente					Tajo Tabaco					Tajo Annex					Tajo EWP				
		I por F Cerrejón	por bombeo	por drenes	Q al tajo	Q al tajo	I por F Cerrejón	por bombeo	por drenes	Q al tajo	Q al tajo	I por F Cerrejón	por bombeo	por drenes	Q al tajo	Q al tajo	I por F Cerrejón	por bombeo	por drenes	Q al tajo	Q al tajo
Fecha	días	m3/d	m3/d	m3/d	m3/d	l/s	m3/d	m3/d	m3/d	m3/d	l/s	m3/d	m3/d	m3/d	m3/d	l/s	m3/d	m3/d	m3/d	m3/d	l/s
ene-13	6570	2181.60	1296.00	470.26	415.34	4.81	2596.90	1296.00	30.18	1270.72	14.71	171.92	0.00	0.00	171.92	1.99	4631.47	2332.80	3911.90	-1613.24	-18.67
ene-14	6935	2008.20	1296.00	875.45	-163.25	-1.89	2802.60	1296.00	517.30	989.30	11.45	172.39	0.00	0.00	172.39	2.00	4442.73	2332.80	3418.30	-1308.37	-15.14
ene-19	8760	1727.20	1296.00	1106.00	-674.80	-7.81	3785.00	2851.20	768.95	164.85	1.91	5733.10	6220.80	409.53	-897.23	-10.38	3644.18	2332.80	2002.70	-691.32	-8.00
ene-24	10585	1827.30	2592.00	1111.80	-1876.50	-21.72	4347.30	3888.00	595.09	-135.79	-1.57	11728.00	10386.00	1728.80	-386.80	-4.48	3090.05	2332.80	1314.10	-556.85	-6.45
ene-29	12410	2110.60	3369.60	1320.60	-2579.60	-29.86	4022.40	3888.00	504.87	-370.47	-4.29	16532.00	13824.00	2175.20	532.80	6.17	3010.52	3369.60	472.76	-831.84	-9.63
ene-32	13505	2372.20	3369.60	1309.10	-2306.50	-26.70	2809.60	0.00	0.00	2809.60	32.52	4417.80	0.00	0.00	4417.80	51.13	3045.19	4147.20	82.01	-1184.02	-13.70
ene-33	13870	2448.50	3369.60	1306.90	-2228.00	-25.79	2823.10	0.00	0.00	2823.10	32.67	3483.50	0.00	0.00	3483.50	40.32	3156.20	4147.20	1041.90	-2032.90	-23.53
ZONA DE BALANCE		22					20					23					24				
Tiempo		Tajo Patilla					Tajo Cerrejón Centro					Tajo Barrancón									
		I por F Cerrejón	por bombeo	por drenes	Q al tajo	Q al tajo	I por F Cerrejón	por bombeo	por drenes	Q al tajo	Q al tajo	I por F Cerrejón	por bombeo	por drenes	Q al tajo	Q al tajo					
Fecha	días	m3/d	m3/d	m3/d	m3/d	l/s	m3/d	m3/d	m3/d	m3/d	l/s	m3/d	m3/d	m3/d	m3/d	l/s					
ene-13	6570	1078.84	1036.80	1404.80	-1362.76	-15.77	6271.50	2332.80	2247.40	1691.30	19.58	330.74	0.00	0.00	330.74	3.83					
ene-14	6935	1255.93	1036.80	2267.70	-2048.57	-23.71	6269.80	2332.80	1884.70	2052.30	23.75	1413.70	1555.20	0.00	-141.50	-1.64					
ene-19	8760	1261.50	2073.60	401.97	-1214.07	-14.05	6558.50	2332.80	1634.90	2590.80	29.99	1872.70	1555.20	9.69	307.81	3.56					
ene-24	10585	1030.77	1814.40	0.00	-783.63	-9.07	7900.60	4406.40	1751.80	1742.40	20.17	2361.50	1555.20	361.77	444.53	5.15					
ene-29	12410	958.38	1814.40	0.00	-856.02	-9.91	8928.20	6739.20	1529.40	659.60	7.63	4231.80	3368.10	428.61	435.09	5.04					
ene-32	13505	896.42	1555.20	0.00	-658.78	-7.62	8512.90	4665.60	1043.20	2804.10	32.45	5243.30	4923.30	149.80	170.20	1.97					
ene-33	13870	878.22	1555.20	0.00	-676.98	-7.84	6975.50	0.00	0.00	6975.50	80.73	5212.90	4923.30	55.61	233.99	2.71					
ZONA DE BALANCE		25					26					30									

3.3. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Siendo la conductividad hidráulica K uno de los parámetros que influyen en la respuesta de un modelo, se hizo el análisis clásico de sensibilidad (véase McElwee y Yukler 1978, Aguado et.al 1977, Remson et. Al 1980), modelando directamente una variación en la respuesta Δh , debido a un cambio en el parámetro ΔK , lo que se conoce como coeficiente de sensibilidad U_K :

Coeficiente de sensibilidad: $U = \frac{\Delta h}{\Delta K}$

En cuanto a la calibración se obtiene la misma obtenida con los parámetros sin variar, sin embargo se puede observar que hay zonas muy sensibles donde no hay piezómetros de observación.

4. RESERVAS Y RECURSOS NATURALES

4.1. Reservas Naturales o Permanentes

Las reservas permanentes o naturales, para el caso de los acuíferos libres, se definen como el volumen de agua que se puede drenar del almacenamiento de un acuífero, en toda su extensión o en un área determinada, considerando un valor promedio del espesor saturado durante un periodo de tiempo y el fondo del acuífero (o sustrato impermeable). Esta definición es la aplicable fundamentalmente a los acuíferos cuaternarios en el Cerrejón, y también a los acuíferos terciarios en sus afloramientos que corresponden fundamentalmente a la Capa 2 del modelo de flujo.

La información se extrajo del modelo numérico de flujo. El resultado obtenido para las reservas naturales es de 569 millones de m^3 de agua en la Capa 2 (Cuaternarios).

4.2. Recursos Naturales

Los recursos naturales corresponden a las entradas al sistema acuífero en condiciones naturales, incluye la infiltración directa, los aportes de otros acuíferos y la infiltración desde ríos y lagos. Estos recursos naturales corresponden en promedio a los caudales de entrada a los acuíferos en un modelo en estado estacionario, antes que el ser humano entrara a hacer uso de este recurso.

A partir del balance del modelo estacionario calibrado los recursos naturales son:
Recursos Naturales: 711.2 l/s

Estos recursos naturales para la zona de estudio corresponden a la infiltración total a partir de los ríos, ya que la recarga directa es despreciable.

4.3. Rendimiento Seguro (Recursos Explotables)

El concepto de “recursos explotables” o “reservas de explotación” (Pérez Franco, p. 412, 1995) es idéntico al de “rendimiento seguro”, teniendo varias definiciones; una de las más ampliamente utilizadas es el balance entre la cantidad de agua subterránea extraída anualmente (o caudal medio anual extraído) y la recarga media anual (Caudal medio de recarga). En este caso el rendimiento seguro del acuífero corresponde al recurso natural: 711.2 l/s.

4.4. Bombeo Sostenible

Se tiene también el concepto de bombeo sostenible (que es diferente al de rendimiento sostenible, tratado en el numeral siguiente), el cual se refiere al caudal de bombeo que se puede mantener en forma indefinida sin minar el acuífero.

Efectivamente como se describe en el párrafo anterior este caudal sostenible máximo, se obtuvo mediante varias modelaciones simulando abatimientos extremos en los cuaternarios en el centro de la cuenca cerca al Río Ranchería, pero sin minar el acuífero el cual resultó cercano a los 1800 l/s, en donde hay recarga inducida máxima de todos los ríos, (es decir secando todos los ríos, en épocas de estiaje, lo cual no es sostenible ecológicamente).

4.5. Rendimiento Sostenible

El concepto de rendimiento sostenible implica el uso y aprovechamiento de los recursos de agua subterránea, de tal forma que se puedan mantener en forma indefinida sin tener consecuencias ambientales, económicas o sociales no deseables (Alley y Lake 2004). Un rendimiento sostenible depende no solamente de las variables hidrológicas del sistema acuífero (incluyendo la el caudal adicional disponible por recarga inducida, y disminución de la descarga natural), sino de variables ecológicas (como por ejemplo caudales mínimos en ríos y manantiales en épocas de estiaje), variables económicas y tecnológicas (por ejemplo aprovechamiento por drenes en lugar de pozos), y variables sociopolíticas (por ejemplo aumentar la recarga inducida a partir de cauces sin ninguna restricción de uso humano o ecológico, o definir prioridades, por ejemplo zonas de uso de la tierra- aprovechamiento agrícola, minero, bosques, etc.).

Para el caso que nos ocupa se corrieron varios escenarios en estado estacionario, simulando los pozos existentes en el cuaternario, colocando varios pozos adicionales de 8 l/s, en el Aluvión del Ranchería, considerando como variable ambiental que no se tuviera recarga inducida mayor que los caudales mínimos medios mensuales del mismo Río. El valor resultante fue de 400 l/s, del mismo orden que los caudales medios mínimos mensuales de 373.33 l/s.

5. PLAN DE MONITOREO

De acuerdo a los impactos identificados y las medidas de mitigación propuestas se plantean las siguientes medidas de monitoreo:

- Como la precipitación tiene un comportamiento bimodal, se recomienda realizar monitoreos de niveles en los piezómetros que hacen parte de la red actual, tanto en los dos períodos secos como en los dos períodos lluviosos, lo que generaría 4 campañas de monitoreo al año. Otra alternativa es realizar mediciones diarias de niveles utilizando medidores electrónicos (transductores de presión) instalados en cada piezómetro para tener información más detallada que permita evaluar la respuesta de los niveles piezométricos a la precipitación.
- Los caudales en los pozos de desagüe deben monitorearse, utilizando para ello totalizadores cuya lectura y control debe realizarse por lo menos a nivel trimestral.
- Se recomienda continuar con el monitoreo de los cauces principales que se encuentran en el área de minería para cuantificar el impacto que pueda tener el efecto de las excavaciones en el área de influencia.
- Las barreras semipermeables deben estar dotadas de sistemas de monitoreo que permitan determinar la eficiencia de las mismas. Para ello es necesario instalar pozos de monitoreo a lado y lado de las barreras para medir los niveles piezométricos. Aguas abajo de las barreras se deben ubicar los pozos de monitoreo en la zona cuaternaria más profunda, ya que en principio éste sector debe quedar seco. Aguas arriba de la barrera se recomienda instalar piezómetros con separaciones de 100 m entre ellos en donde se mida periódicamente (semanalmente) los niveles piezométricos.

5.1. Caracterización de acuíferos

Durante el año 2.009 no se hicieron pruebas de caracterización de acuíferos.

6. PLANES PARA EL AÑO 2.010 EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MANEJO

Para el año 2.010 se tienen los siguientes planes:

- 6.1. **Construcción y monitoreo de barreras de baja permeabilidad:** durante el año 2.010 se construirá la barrera de baja permeabilidad número 2 de Patilla. En el informe “BARRERAS DE BAJA PERMEABILIDAD-INFORME AÑO 2.009”, se presentan algunas de las características de diseño de dicha barrera y un mapa con su localización.

Se estima que durante este año se puedan iniciar estudios para el diseño de una barrera de baja permeabilidad en el borde sur occidental del tajo Oreganal, y de dos barreras en el norte del tajo La Puente. También estudios para desviación en el arroyo Palomino y desviación en el arroyo Bruno.

Con relación al monitoreo de las barreras, se continuará haciendo sobre el nivel piezométrico, al lado y lado de cada barrera. También se continuará con la limpieza y reconstrucción de algunos de los piezómetros, ya que muchos fueron destruidos o dañados por el invierno del segundo semestre del 2.008. Para el monitoreo también se seguirá haciendo énfasis en el seguimiento visual a los taludes cortados frente a las barreras.

- 6.2. **Construcción y monitoreo de pozos de bombeo y drenes horizontales:** en el cuadro siguiente se presenta el plan de pozos y drenes para el año 2010:

INSTALACIÓN	PLANEADO	
	No.	m
POZOS DE BOMBEO	12	1680
DRENES HORIZONTALES	64	8200

En cuanto al monitoreo del caudal se espera bombear 2'845.000 metros cúbicos de agua, operando 60 pozos.

- 6.3. **Construcción de zanjas corta flujos y sumideros:** para el año 2.010 no se tiene planeado la construcción de zanjas corta flujos o sumideros que tengan como objetivo controlar los flujos de las aguas subterráneas.

- 6.4. **Monitoreo de los niveles piezométricos y calidad del agua subterránea:** para el año 2.010 no se tiene planeado construir nuevas instalaciones que tengan como objetivo el monitoreo regional.

Se rehabilitarán algunos piezómetros que se dañaron en las barreras de baja permeabilidad. También, se instalarán los requeridos para el monitoreo de la

nueva barrera de baja permeabilidad No 2 de Patilla, estimados según los estudios de diseño en un número de 10 unidades.

Se continuará haciendo el monitoreo del nivel piezométrico en los piezómetros instalados en los acuíferos cuaternarios. También se continuará con el monitoreo del nivel y de calidad del agua en los pozos de abastecimiento del acuífero del río Ranchería.

- 6.5. **Mejoramiento del modelo hidrogeológico del Cerrejón:** para el año 2.010 no se tiene previsto la elaboración o mejoramiento del modelo hidrogeológico de flujos.
- 6.6. **Caracterización de acuíferos:** durante el año 2.010 no se tiene planeado caracterizar acuíferos.