



**REPÚBLICA DEL PERÚ  
MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS**

**GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE  
IMPACTOS EN LA CALIDAD  
DE LAS AGUAS SUPERFICIALES  
POR ACTIVIDADES  
MINERO METALÚRGICAS**

**SUB - SECTOR MINERÍA**

**Volumen XXII**

---

**Dirección General de  
Asuntos Ambientales Mineros**

---

**REPÚBLICA DEL PERÚ**  
**MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS**

---

---

**GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS  
EN LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES  
POR ACTIVIDADES MINERO METALÚRGICAS**

---

---

SUB - SECTOR MINERÍA

**DIRECCIÓN GENERAL DE  
ASUNTOS AMBIENTALES MINEROS**

**LIMA - PERÚ**

Preparado por

**Alex Gordine, P.Eng.**

**Dr. Jorge Chávez**

**Fernando Medina, M.Phil.**

por encargo del



**PROYECTO DE REFORMA DEL  
SECTOR DE RECURSOS  
MINERALES DEL PERU**



**Canadian International  
Development Agency**

**Agence canadienne de  
développement international**

Todos los derechos reservados. Esta guía no puede ser total o parcialmente reproducida, memorizada en sistemas de archivo o transmitida en cualquier forma o medio electrónico, mecánico, fotocopia o cualquier otro sin la autorización previa del Ministerio de Energía y Minas del Perú.

Primera Edición: Setiembre de 2007

# Índice

## ÍNDICE

Sección .....	Página
Índice .....	iii
Glosario .....	vii
Acrónimos .....	ix
Presentación .....	xi
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. MARCO LEGAL.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Estándares de Calidad Ambiental .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Límites Máximos Permisibles .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Estándares Internacionales .....</b>	<b>5</b>
<b>3. INFORMACIÓN DE LÍNEA BASE .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1 Criterios para el Establecimiento de la Línea Base .....</b>	<b>9</b>
3.1.1 Definición del Área de Estudio .....	9
3.1.2 Dominio Temporal .....	9
<b>3.2 Línea Base Hidrológica .....</b>	<b>10</b>
3.2.1 Clima y Meteorología.....	12
3.2.2 Caudales .....	19
3.2.3 Métodos de Colección de Datos Hidrológicos .....	26
3.2.4 Datos Primarios (Específicos del Sitio) .....	26
3.2.5 Usos y Usuarios del Agua .....	33
3.2.6 Otras Minas en el Área.....	33
3.2.7 Aseguramiento y Control de la Calidad (QA/QC) de los Datos de Línea Base Hidrológica .....	33
3.2.8 Balance Hídrico .....	34
3.2.9 Curvas de Descarga.....	36
<b>3.3 Línea Base de Calidad de Agua.....</b>	<b>36</b>
3.3.1 Consideraciones para la definición de la línea base de calidad de aguas.....	37
3.3.2 Criterios para Preparación de la Línea Base de Calidad de Agua Superficial.....	38
3.3.3 Evaluación de Resultados de Línea Base de Calidad de Agua.....	39
3.3.4 Aseguramiento y Control de Calidad de los Resultados del Monitoreo.....	45
<b>4. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1 Modelos Hidrológicos Disponibles en el Mercado .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2 Uso de los Modelos Hidrológicos en los Estudios Ambientales de             Proyectos Mineros .....</b>	<b>57</b>
<b>5. MODELAMIENTO DE CALIDAD DE AGUAS.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1 Introducción .....</b>	<b>59</b>
<b>5.2 Transporte y Destino de los Contaminantes en los Cuerpos de             Aguas Superficiales Naturales.....</b>	<b>62</b>
5.2.1 Fundamentos Teóricos.....	62
5.2.2 Soluciones Numéricas.....	67

# Índice

5.3	Modelos de Calidad de Aguas Disponibles en el Mercado.....	68
6.	EVALUACIÓN DE IMPACTOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES.....	71
6.1	Impactos Hidrológicos .....	71
6.1.1	Nuevos Reservorios .....	71
6.1.2	Derivaciones de Caudal .....	71
6.1.3	Transferencias de Caudal debidas al Bombeo .....	72
6.1.4	Cambios en el Uso del Suelo .....	72
6.2	Impactos en la Calidad de las Aguas .....	73
6.2.1	Fuentes Puntuales.....	73
6.2.2	Fuentes Difusas.....	73
6.3	Ejemplos de Modelamiento .....	73
6.3.1	Modelos Hidrológicos .....	73
6.3.2	Modelo de Balance Hídrico de Todo el Sitio del Proyecto .....	75
6.3.3	Modelos de Calidad de Aguas .....	75
6.4	Interpretación de los Resultados de los Modelos.....	75
7.	REFERENCIAS.....	77

## Lista de Tablas

Tabla 2-1	Estándares de Calidad de Agua.....	4
Tabla 2-2	Límites Máximos Permisibles de Vertimientos en la Industria Minero-Metalúrgica - (R.M. 011-96-EM/VMM).....	5
Tabla 2-3	Estándares Internacionales .....	6
Tabla 2-4	Límites de Descarga para la Industria Minero Metalúrgica (WBG, 1998).....	7
Tabla 3-1	Ejemplo de Resumen de Flujo Diario Promedio – (Área de Drenaje = 9,8 km <sup>2</sup> ).....	32
Tabla 3-2	Tabla General de Resultados .....	40
Tabla 4-1	Características de Algunos Modelos Hidrológicos no Distribuidos .....	51
Tabla 4-2	Características de Algunos Modelos Hidrológicos Semidistribuidos .....	52
Tabla 4-3	Características de Algunos Modelos Hidrológicos Distribuidos .....	55
Tabla 5-1	Criterios de Clasificación de los Modelos de Calidad de Aguas .....	60
Tabla 5-2	Resumen de los principales modelos de calidad de aguas aplicables a estudios mineros.....	69

## Lista de Figuras

Figura 3-1	Mecanismo del Pluviómetro de Cubeta Basculante.....	13
Figura 3-2	Ejemplo de Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de Precipitación – Baffin Island, Canadá .....	17
Figura 3-3	Ejemplo del Diagrama de la Rosa de Vientos Estación Meteorológica ESTM-0.....	18
Figura 3-4	Ejemplo de Curva de Duración del Flujo Diario – Río Blanco, en el Puente de Amistad.....	22
Figura 3-5	Ejemplo de Curva de Descarga.....	30
Figura 3-6	Ejemplo del Gráfico de Precipitación Anual Histórica .....	35
Figura 3-7	Ejemplo de Diagrama de Stiff.....	46
Figura 6-1	Resultado de la simulación hidrológica continua con HEC-HMS para varios meses.....	74
Figura 6-2	Resultado de la simulación hidrológica continua con HEC-HMS para unos pocos días .....	74

# Índice

## Lista de Fotos

Foto 3-1	Pluviómetros Manuales .....	13
Foto 3-2	Pluviómetro Automático.....	13
Foto 3-3	Estación Meteorológica Automática .....	14
Foto 3-4	Bandejas de Evaporación.....	15
Foto 3-5	Piranómetro y Medidor de Radiación Neta .....	16
Foto 3-6	Anemómetro .....	18
Foto 3-7	Vertedero con el Área de Control de Gaviones.....	27
Foto 3-8	Vertedero con el Área de Control de Gaviones.....	27
Foto 3-9	Sección Trapezoidal de Control para Medición de Flujo.....	28
Foto 3-10	Sección Trapezoidal de Control para Medición de Flujo.....	28
Foto 3-11	Dispositivos Electrónicos de Almacenamiento de Datos .....	29
Foto 3-12	Flujómetro .....	29
Foto 3-13	Flujómetro en Suspensión .....	29

## Lista de Anexos

Anexo A	Ejemplo de Error en las Unidades de Datos de Precipitación Reportados
Anexo B	Ejemplo de Cálculos de Aseguramiento y Control de Calidad de los Análisis Químicos
Anexo C	Teorema del Transporte de Reynolds
Anexo D	Ejemplo de Simulación Hidrológica Realizada con el Modelo GAWSER
Anexo E	Ejemplo de Modelamiento del Balance de Aguas de Toda el Sitio y de la Calidad de las Aguas para el Proyecto Alto Chicama usando GOLDSIM

## GLOSARIO

**Advección:** Transporte de masa debida al movimiento del fluido.

**Convección:** Advección

**Derivada Lagrangiana:** La derivada total de una propiedad del fluido (e.g., concentración de un parámetro) con respecto al tiempo para la masa de control.

**Derivada material:** Derivada Lagrangiana.

**Difusión turbulenta:** Transferencia de masa debida a la turbulencia del fluido (en rigor se trata de un transporte advectivo, pero con trayectorias aleatorias).

**Difusión:** Transferencia de masa debida únicamente al gradiente de concentración de las moléculas del soluto.

**Dispersión:** Transferencia de masa debida al efecto conjunto de la difusión y la difusión turbulenta.

**Elementos finitos:** Método para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales complejas mediante la discretización del dominio en una red de segmentos y nodos, de modo tal que las ecuaciones diferenciales parciales son reemplazadas por el conjunto de valores en los nodos.

**Hidrograma Unitario:** Hidrograma de escorrentía directa producido por una cantidad unitaria de precipitación efectiva uniformemente repartida sobre una cuenca durante un tiempo determinado

**Masa de control:** Una porción de la masa de un fluido cuyo comportamiento es observado independientemente de su desplazamiento o posición (e.g., el observador se desplaza junto con la masa del fluido). En el estado inicial, la masa de control coincide con el volumen de control.

**Método Euleriano:** Método para el estudio de las propiedades del fluido mediante el cual se observa el cambio de la propiedad en el volumen de control.

**Método Lagrangiano:** Método de estudio de las propiedades del fluido mediante el cual se estudian los cambios de la propiedad dada para la masa de control.

**Período de Retorno:** También llamado intervalo de recurrencia, representa el número de años que transcurren en promedio para que un evento sea igualado o excedido. Un evento tendrá un período de retorno  $T$  si existe una probabilidad  $1/T$  que sea igualado o excedido en un año cualquiera.

**Simulación numérica:** Representación de un sistema (e.g., hidrológico) por otro matemático (generalmente en computador) que pueda reproducir el comportamiento del sistema natural.

**Teorema de Gauss-Green (teorema de la divergencia):** Teorema que relaciona el cambio de un campo escalar en un volumen de control (e.g., una propiedad de un fluido) con el flujo del campo a través de la superficie que limita el volumen de control.

$$\iiint_V \nabla \cdot \vec{f} dV = \iint_S \vec{f} \cdot \vec{n} dS$$

donde:

- $\vec{f}$  es un campo vectorial,
- $V$  es el volumen de control y
- $S$  es la superficie que delimita el volumen de control.

$$\nabla \cdot \vec{f} = \text{div}(\vec{f}) = \frac{\partial f_x}{\partial x} + \frac{\partial f_y}{\partial y} + \frac{\partial f_z}{\partial z}$$

**Teorema del Transporte de Reynolds:** Teorema que relaciona el método Lagrangiano con el método Euleriano en el estudio de una propiedad de un fluido.

$$\frac{D}{Dt} \iiint_M \varphi \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \varphi \rho dV + \iint_S \varphi \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS$$

donde:

- $M$  es la masa de control
- $V$  es el volumen de control
- $S$  es la superficie de contorno del volumen de control
- $\varphi$  es la propiedad  $\Phi$  por unidad de masa del fluido
- $\rho$  es la densidad del fluido

o en su forma diferencial:

$$\frac{D}{Dt}(\varphi \rho) = \frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho) + \nabla \cdot (\varphi \rho \vec{v})$$

**Tiempo de Retardo de la Cuenca:** Diferencia de tiempo entre el centroide del histograma de lluvia y el centroide del histograma de escorrentía. En la práctica, se puede asumir que el tiempo de retardo es aproximadamente igual a la diferencia de tiempo entre el centroide y el pico del histograma.

**Tránsito de Avenidas:** Técnica hidrológica utilizada para calcular el efecto del almacenamiento en un canal sobre la forma y movimiento de una onda de avenida.

**Volumen de control:** Una porción del volumen de un fluido con una posición fija en el espacio. En el estado inicial, el volumen de control está ocupado por la masa de control.



# Acrónimos

## ACRÓNIMOS

ACCC	Association of Community Colleges of Canada (Asociación de Institutos Tecnológicos de Canadá)
ACDI	Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional
CCME	Canadian Council of Ministers of the Environment (Consejo Canadiense de Ministros del Ambiente)
COT	Carbono Orgánico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DS	Decreto Supremo
ECA	Estándares de Calidad Ambiental
ENSO	El Niño Southern Oscillation (Oscilación Austral de El Niño)
FDC	Flow Duration Curve (Curva de Duración de Caudal)
FDC	Flow Duration Curve (Curva de Duración de Caudal)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LMP	Límites Máximos Permisibles
MEM	Ministerio de Energía y Minas del Perú
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Atmosférica y Oceánica Nacional)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMS	Organización Mundial de la Salud
PCB	Polychlorinated Biphenils (Bifenilos policlorados)
PERCAN	Proyecto de Reforma del Sector de Recursos Minerales del Perú
PMF	Probable Maximum Flood (Inundación Máxima Probable)
PMF	Probable Maximum Flood (Inundación Máxima Probable)
PMP	Probable Maximum Precipitation (Precipitación Máxima Probable)
PMP	Probable Maximum Precipitation (Precipitación Máxima Probable)
RD	Resolución Directoral
RM	Resolución Ministerial
SOI	Southern Oscillation Index (Índice de Oscilación Austral)
STD	Sólidos Totales Disueltos
STS	Sólidos Totales en Suspensión
USEPA	United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
USNWS	Servicio Climático Nacional de los Estados Unidos (United States National Weather Service)

## Acrónimos

---

WAD	Weak Acid Dissociable (Disociable en ácido débil). Se aplica al cianuro (ver Glosario)
WBG	World Bank Group (Grupo del Banco Mundial)

# Presentación

## PRESENTACIÓN

La minería cumple un rol fundamental en la economía del Perú y constituye un gran factor de desarrollo. Es el primer proveedor de divisas y aporta hoy más del 60% del total de nuestros ingresos por exportaciones; no obstante, tiene también un potencial de generación de impactos ambientales que, de no recibir un tratamiento técnico integral y oportuno, puede contaminar y afectar los recursos naturales, como de hecho ya ha ocurrido en el pasado.

La experiencia internacional demuestra no sólo que es viable desarrollar las actividades mineras cuidando el ambiente, sino que la excelencia ambiental constituye un imperativo ético imprescindible de solidaridad con las futuras generaciones y para el logro del Bien Común que es la causa final del Estado y la sociedad en todo sistema democrático que se expresa en la seguridad y el bienestar general de las personas sin distinción de raza, sexo, condición económica o de cualquiera otra índole.

La evaluación del impacto de las actividades mineras sobre las aguas superficiales constituye una tarea clave, tanto para las empresas mineras y sus consultores como para el propio Ministerio de Energía y Minas, en su calidad de autoridad ambiental sectorial. Por ello me complace presentar esta Guía, elaborada con el concurso de expertos canadienses y peruanos, gracias a la colaboración de la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional - ACDI a través del Proyecto de Reforma del Sector de Recursos Minerales del Perú - PERCAN.

Esta Guía será de gran utilidad para los responsables de las empresas mineras, consultores, funcionarios del Estado y para todas las personas e instituciones interesadas en la identificación, evaluación, prevención y mitigación del impacto de las actividades mineras sobre el recurso hídrico.

El Ministerio de Energía y Minas renueva así su compromiso con los objetivos trazados por el Gobierno en la lucha contra la pobreza y en la promoción de las inversiones responsables en nuestro país.

Lima, 10 de setiembre de 2007

Arq. Juan Valdivia Romero  
Ministro de Energía y Minas



## 1. INTRODUCCIÓN

La presente *Guía para la Evaluación de Impactos en Calidad de las Aguas Superficiales por Actividades Minero-Metalúrgicas* ha sido preparada por el equipo del Proyecto de Reforma del Sector Público Minero (PERCAN), bajo los auspicios de la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (ACDI) para el Ministerio de Energía y Minas (MEM).

El objetivo de la Guía es proporcionar al personal del MEM responsable de la evaluación de estudios ambientales una base para la revisión de los aspectos de hidrología y calidad de aguas de los Estudios de Impacto Ambiental de proyectos del sector minero.

La Guía desarrolla los principales aspectos relacionados con la regulación de la calidad de las aguas, la preparación de la línea base de hidrología y calidad de aguas y la evaluación de los impactos, con particular énfasis en el modelamiento numérico de los aspectos hidrológicos y de calidad de aguas.



## 2. MARCO LEGAL

La normatividad legal peruana en materia de calidad ambiental distingue dos instrumentos complementarios, los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP).

Los ECA constituyen los objetivos de calidad aplicables a los componentes del ambiente, e.g., aire ambiental, cuerpos de agua naturales, suelos, etc.

Por su parte, los Límites Máximos Permisibles (LMP) son los valores límite aplicables a las descargas al ambiente, en particular el vertimiento de efluentes líquidos y las emisiones de gases y partículas a la atmósfera. Los LMP son valores de cumplimiento obligatorio y son medidos en la propia descarga.

### 2.1 ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL<sup>1</sup>

Los estándares de calidad ambiental para aguas están definidos por el Reglamento de la Ley General de Aguas<sup>2</sup>. Los estándares de calidad están definidos en función al uso actual o potencial del cuerpo de agua, según las siguientes seis categorías:

- Uso I – Abastecimiento doméstico con simple desinfección
- Uso II – Abastecimiento doméstico con tratamiento convencional
- Uso III – Riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales
- Uso IV – Zonas recreativas de contacto primario (baños y similares)
- Uso V – Zonas de pesca de mariscos bivalvos
- Uso VI – Zonas de preservación de fauna acuática y pesca recreativa o comercial

Los estándares de calidad ambiental de agua se presentan en la Tabla 2-1.

Los valores de los ECA son proporcionados como valores absolutos sin indicar su carácter estadístico, con la sola excepción de los coliformes totales y fecales, en donde se indica que los límites se aplican al 80% de 5 o más muestras. Asimismo, los ECA son aplicables en todo el territorio del país, sin tomar en cuenta las condiciones geoquímicas específicas de cada sitio.

Si bien la norma no lo indica de manera explícita, la Autoridad de Salud<sup>3</sup> ha manifestado en sucesivas oportunidades que los límites para metales establecidos en los ECA de aguas deben aplicarse al metal total y no a la fracción disuelta (i.e., concentración total del metal, incluyendo la fracción disuelta y la fracción sólida o adsorbida en las partículas sólidas en suspensión, tal como se obtiene al analizar una muestra sin filtrar).<sup>4</sup>

<sup>1</sup> A la fecha de cierre de esta edición, existe una propuesta de nuevos estándares de calidad ambiental de aguas, la misma que se encuentra en proceso de revisión y consulta pública.

<sup>2</sup> D.S. N° 261-69-AP, modificado por D.S. N° 007-83-SA y D.S. N° 003-2003-SA.

<sup>3</sup> Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud (DIGESA).

<sup>4</sup> Se reconoce también que ciertos valores no son apropiados y requieren una revisión. Tal es el caso de los límites para nitratos y níquel, donde los ECA son excesivamente rigurosos en comparación con los de otras jurisdicciones y organismos internacionales. Por ejemplo, el ECA peruano para níquel en aguas de Uso I (uso doméstico) es 0,002 mg/L; mientras que el valor guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el agua potable es superior en un orden de magnitud (0,02 mg/L). Asimismo, el ECA peruano para nitrato en aguas de Uso I es de

# Información de Línea de Base

En ciertos casos, la norma peruana de ECA establece que los valores límite deben ser obtenidos mediante pruebas de toxicidad (e.g. zinc, níquel y cobre en Uso VI). No obstante, los criterios para el desarrollo de estas pruebas aún no han sido desarrollados en el Perú.

**Tabla 2-1 Estándares de Calidad de Agua**

(D.S. 261-69-AP, mod. por D.S. 007-83-SA y D.S. 003-2003-SA)

**Usos:**

- I. Abastecimiento doméstico con simple desinfección
- II. Abastecimiento doméstico con tratamiento convencional
- III. Riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales
- IV. Zonas recreativas de contacto primario (baños y similares)
- V. Zonas de pesca de mariscos bivalvos
- VI. Zonas de preservación de fauna acuática y pesca recreativa o comercial

Parámetro	Unidad	I	II	III	IV	V	VI
Coliformes Totales	MPN/100 mL(1)	8,8	20 000	5 000	5 000	1 000	20 000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL(1)	0	4 000	1 000	1 000	200	4 000
DBO5(2)	mg/L	5	5	15	10	10	10
Oxígeno disuelto(3)	mg/L	3	3	3	3	5	4
Nitratos(4)	mg/L de N	0,01	0,01	0,1			
Sulfuros	mg/L	0,001	0,002	(5)		0,002	0,002
Selenio(6)	mg/L	0,01	0,01	0,05		0,005	0,01
Mercurio(6)	mg/L	0,002	0,002	0,01		0,0001	0,0002
Arsénico(6)	mg/L	0,1	0,1	0,2		0,01	0,05
Cadmio(6)	mg/L	0,01	0,01	0,05		0,0002	0,004
Cobre(6)	mg/L	1	1	0,5		0,01	(7)
Cromo(6)	mg/L	0,05	0,05	1		0,05	0,05
Níquel(6)	mg/L	0,002	0,002	(5)		0,002	(8)
Plomo(6)	mg/L	0,05	0,05	0,1		0,01	0,03
Zinc(6)	mg/L	5	5	25		0,02	(8)
Cianuro WAD	mg/L	0,08	0,08	0,1			
Cianuro libre	mg/L					0,022	0,022
Esteres Ftalatos(9)	mg/L	0,0003	0,0003	0,0003		0,0003	0,0003
Fenoles	mg/L	0,0005	0,001	(5)		0,001	0,1
PCB(10)	mg/L	0,001	0,001	(5)		0,002	0,002
MEH(11)	mg/L	1,5	1,5	0,5	0,2		
SAAM(12)	mg/L	0,5	0,5	1	0,5		
CAE(13)	mg/L	1,5	1,5	5,0	5,0		
CCE(14)	mg/L	0,3	0,3	1,0	1,0		

- (1) Número máximo probable en 100 mL de muestra, valor máximo en 80% de 5 o más muestras.
- (2) Prueba a 5 días y a 20°C.
- (3) Valores mínimos.
- (4) Como mg/L de nitrógeno.
- (5) Provisionalmente aplicar límite para uso V.
- (6) Si bien la regulación no lo especifica, se asume que son concentraciones de metal total.
- (7) 0,1\*LC50 (pruebas de 96 horas).
- (8) 0,02\*LC50 (pruebas de 96 horas).
- (9) En la norma aparece como "Esteres Estalatos". Se presume que se refiere a ésteres ftalatos.
- (10) Bifenilos policlorados
- (11) Material extractable en hexano (principalmente grasas).
- (12) Sustancias activas en azul de metileno (principalmente detergentes).
- (13) Extracto de columna de carbón activado por alcohol (según el método de flujo lento)
- (14) Extracto de columna de carbón activado por cloroformo (según el método de flujo lento).

0,01 mg/L (como nitrógeno), mientras que el valor guía de la OMS para agua potable es superior en tres órdenes de magnitud (11,3 mg/L).



## 2.2 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES<sup>5</sup>

La descarga de efluentes líquidos de las actividades minero-metalúrgicas está regulada por los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la Resolución Ministerial N°011-96-EM/VM. Los LMP están definidos en términos de valores absolutos de concentración (salvo en el caso del pH) para una lista corta de parámetros, sin considerar el volumen de la descarga ni la capacidad de asimilación del cuerpo receptor. La Tabla 2-2 muestra los límites de descarga aplicables a efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.

La norma de LMP establece dos series de valores. La primera (valor en cualquier momento) se aplica a cualquier muestra y representa el límite absoluto que nunca debe excederse. La segunda (promedio anual) se aplica al promedio de los valores obtenidos a lo largo de un período de un año. De acuerdo con el cronograma de monitoreo establecido por la propia norma, el número mínimo de muestras por año varía entre una y 52 dependiendo del volumen de la descarga y del parámetro en cuestión.

Los LMP correspondientes a metales están definidos para la fracción disuelta, por lo que no son directamente comparables a los ECA<sup>6</sup>.

**Tabla 2-2 Límites Máximos Permisibles de Vertimientos en la Industria Minero-Metalúrgica - (R.M. 011-96-EM/VMM)**

Parámetro	Unidad	Valor en Cualquier Momento	Promedio Anual
pH		6 < pH < 9	6 < pH < 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Plomo (disuelto)	mg/L	0,4	0,2
Cobre (disuelto)	mg/L	1	0,3
Zinc (disuelto)	mg/L	3	1
Hierro (disuelto)	mg/L	2	1
Arsénico (disuelto)	mg/L	1	0,5
Cianuro total*	mg/L	1	1

\* Equivalente a 0,1 mg/L de CN libre y 0,2 mg/L de CN WAD.

## 2.3 ESTÁNDARES INTERNACIONALES

Además de los ECA y LMP vigentes en el Perú, existen diversos estándares ambientales que son frecuentemente citados como referencia, particularmente para proyectos de gran envergadura. A continuación se mencionan los más comunes. De los estándares citados, sólo los de la Corporación Financiera Internacional se aplican a la descarga; todos los demás se aplican al cuerpo receptor.

- Organización Mundial de la Salud: *Estándares para agua potable* (OMS 2004);
- Consejo Canadiense de Ministros del Ambiente: *Guías de Calidad Ambiental* (CCME 2004). Incluye estándares para agua potable (cap. 2), preservación de fauna acuática (cap. 4), agua para irrigación (cap. 5) y agua para consumo de animales domésticos (cap. 5);

<sup>5</sup> A la fecha de cierre de esta edición, el MEM viene trabajando en el desarrollo de una propuesta de nuevos límites máximos permisibles para vertimiento de efluentes líquidos de las actividades minero-metalúrgicas.

<sup>6</sup> Para una mayor discusión sobre concentraciones de metales totales y disueltos el lector deberá remitirse al Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos (MEM, 1994).

## Información de Línea de Base

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos: *Estándares Nacionales Primarios para Agua Potable* (USEPA 2003);
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos: *Criterios Nacionales de Calidad de Agua Recomendados* (USEPA 2002).
- Corporación Financiera Internacional (Grupo del Banco Mundial): *Manual de Prevención y Mitigación de la Contaminación - Requerimientos para la Descarga de Efluentes Presentes en las Guías para la Industria* (WBG 1998).

La Tabla 2-3 muestra un resumen de los estándares internacionales de calidad de agua ambiental citados, clasificados según el uso del agua, y la Tabla 2-4 muestra los límites de descarga de la CFI para actividades mineras.

**Tabla 2-3 Estándares Internacionales**

Parámetro	Unidad	Agua Potable			Preservación de Fauna Acuática		Irrigación	Consumo Animales
		OMS (2004)	CCME (2005)	USEPA (2005)	CCME (1999)	USEPA (2005)	CCME (1999)	CCME (1999)
Alcalinidad	mg/L					20		
Dureza	mg/L		80-100					
COT	mg/L							
Amoniaco	mg/L	1,5						
Calcio	mg/L							1000
Cloruro	mg/L	250	<250	250			100-700	
Cianuro total	mg/L	0,07	0,2		0,005	0,0052		
Cianuro libre	mg/L			0,2				
Cinauro WAD	mg/L							
Fluoruros	mg/L		1,5		0,12		1	1-2
Potasio	mg/L							
Sodio	mg/L	200	<200					
Sulfatos	mg/L	250	<500	250				1000
Sulfuros	mg/L							
NO <sub>3</sub>	mg/L		10	10	13			
NO <sub>2</sub> /NO <sub>3</sub>	mg/L							100
NO <sub>2</sub>	mg/L		3,2	1	0,06			10
Aluminio	mg/L		0,1		0,005 - 0,1		5	5
Antimonio	mg/L		0,006	0,006				
Arsénico	mg/L	0,01	0,005	0,01	0,005	0,15	0,1	0,025
Bario	mg/L	0,7	1					
Berilio	mg/L			0,004			0,1	0,1
Bismuto	mg/L							
Boro	mg/L	0,3	5				0,5-6	5
Cadmio	mg/L	0,003	0,005	0,005	0,000017	0,00025	0,0051	0,08
Cromo	mg/L	0,05	0,05	0,1	III-0,0089 VI-0,001	III-0,074; VI-0,011	III-0,0049; VI-0,008	III-0,05; VI-0,05
Cobalto	mg/L						0,05	1
Cobre	mg/L	2	<1,0 (1)	1,3	0,002 - 0,004	0,009	0,2 - 1	0,5 - 5
Hierro	mg/L		<0,3 (1)		0,3		5	
Plomo	mg/L	0,01	0,01	0,015	0,001 - 0,007	0,0025	0,2	0,1
Litio	mg/L						2,5	
Magnesio	mg/L							
Manganeso	mg/L	0,4	<0,05 (1)				0,2	
Mercurio	mg/L	0,001	0,001	0,002	0,000026	0,00077		0,003
Molibdeno	mg/L	0,07			0,073		0,01 - 0,05	0,5
Níquel	mg/L	0,02			0,025 - 0,150	0,052	0,02	1
Selenio	mg/L	0,01	0,01	0,05	0,001	0,005	0,02 - 0,05	0,05

# Información de Línea de Base

**Tabla 2-3 Estándares Internacionales**

Parámetro	Unidad	Agua Potable			Preservación de Fauna Acuática		Irrigación	Consumo Animales
		OMS (2004)	CCME (2005)	USEPA (2005)	CCME (1999)	USEPA (2005)	CCME (1999)	CCME (1999)
Plata	mg/L				0,0001			
Estroncio	mg/L							
Vanadio	mg/L						0,1	0,1
Zinc	mg/L		<5,0 (1)		0,03	0,12	1 - 5	50
Fenoles	mg/L				0,004			
Detergente aniónico	mg/L			0,5				
Turbidez	mg/L	5		5				
STS	mg/L							
STD	mg/L	1000	<500	500			500-1500	3000
pH			6,5-8,5	8,5	6,5-9			

\* En Cromo, III= Cromo trivalente; VI= Cromo hexavalente.

**Tabla 2-4 Límites de Descarga para la Industria Minero Metalúrgica (WBG, 1998)**

Parámetro	Unidad	Límites de Emisión de la Industria Minero Metalúrgica- (WBG, 1998)							
		Guías Generales	Fabricación Aluminio	Minería Metales Base y Fe	Minería y Producción Carbón	Fundición de Cobre	Fundiciones	Hierro y Acero	Fundición Plomo y Zinc
pH		6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
BOD <sub>5</sub>	mg/l	50							
DQO	mg/l	250	150	150				250	
STS	mg/l	50	50	50	50	50	50	50	20
Aceites y Grasas	mg/l	10		10	10		10	10	
Fenoles	mg/l	0,5						0,5	
Cianuro total	mg/l	1		1					
Cianuro libre	mg/l	0,1		0,1				0,1	
Nitrógeno	mg/l	10 (como NH <sub>3</sub> )		0,5					
Fósforo	mg/l	2							
Fluoruro	mg/l	20	20						
Cloruro	mg/l	0,2							
Coliformes	NMP/10 Oml	400							
HC	mg/l	5	5						
Aluminio	mg/l		0,2						
Arsénico	mg/l	0,1		0,1		0,1			0,1
Cadmio	mg/l	0,1		0,1		0,1		0,1	0,1
Cromo	mg/l	0,5						0,5	
Cromo <sup>+6</sup>	mg/l	0,1		0,1					
Cobre	mg/l			0,5		0,5	0,5		0,5
Hierro	mg/l	3,5		3,5		3,5			3,5
Mercurio	mg/l	0,01		0,01	3,5	0,01		0,01	0,01
Níquel	mg/l	0,5		0,5					
Plomo	mg/l	0,1		0,2		0,1		0,2	0,1
Plata	mg/l	0,5							
Estaño	mg/l								
Zinc	mg/l	2		2		1	2	2	2
Metales totales	mg/l	10		10	10	10			5
Selenio	mg/l	0,1							



### 3. INFORMACIÓN DE LÍNEA BASE

La línea base establece las condiciones del entorno antes de que se desarrolle el proyecto. La información de línea base es muy importante porque constituye el punto de referencia a partir del cual se pueden medir los impactos causados por el proyecto. Es por lo tanto necesario que la línea base esté bien documentada y que sus resultados sean científicamente defendibles. De lo contrario, no habrá manera de determinar si un efecto ambiental determinado es atribuible o no a la operación.

En las siguientes secciones se discutirán los criterios para la definición del área de estudio de la línea base y luego los requerimientos de línea base para los componentes de hidrología y calidad de aguas.

#### 3.1 CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE

##### 3.1.1 Definición del Área de Estudio

Es importante que la línea base incluya información de todas las cuencas en las que se desarrollará el proyecto, i.e., todas aquellas cuencas sobre las que se ubican cada uno de los componentes del proyecto o sobre las que dichos componentes podrían ejercer impactos perceptibles, incluyendo los corredores de acceso y transporte. Muchos proyectos ocupan más de una cuenca, por lo que cada una de las cuencas intervenidas debe ser incluida en la caracterización. Esta selección deberá hacerse bajo los escenarios más desfavorables, tales como derrames, fallas de presas de relaves, etc.

En el caso que el proyecto se encuentra cerca a la cabecera de una o más cuencas; el área de la línea base debe extenderse hasta las cabeceras de las cuencas, a pesar de que éstas no serán intervenidas.

En algunos casos específicos, cuando existan hábitats importantes o frágiles, o zonas de agricultura intensa o sensible en cuencas cercanas que no serán intervenidas; es recomendable incluir estas cuencas o parte de ellas dentro de la línea base.

Asimismo, en muchos casos es recomendable incluir aquellas cuencas que, aunque no serán intervenidas, alojan poblaciones que podrían sentirse afectadas por el proyecto. Esto permitirá responder a las preocupaciones de las poblaciones vecinas.

Para definir las cuencas a incluir deben considerarse también las alteraciones naturales o humanas que pueden transportar las aguas más allá de los límites naturales de las cuencas hidrográficas, e.g., canales de regadío, trasvases, captaciones, túneles de drenaje, conductos kársticos, etc.

En general, se debe aplicar un enfoque conservador allí donde exista duda (i.e., es preferible incluir áreas que no serán impactadas que excluir áreas que podrían ser impactadas).

##### 3.1.2 Dominio Temporal

La línea base de hidrología y calidad de aguas debe incluir al menos un año completo de datos de monitoreo hidrometeorológico y de calidad de aguas en el área de estudio, con el fin de caracterizar las fluctuaciones estacionales de escorrentía y clima.

Considerando el tiempo que toma preparar un estudio de impacto ambiental, es importante iniciar el monitoreo hidrometeorológico y de calidad de aguas con bastante anticipación, al menos 1,5 a 2 años antes de requerir la información, de preferencia durante la etapa de exploración. Las empresas mineras, especialmente las empresas pequeñas o junior, a menudo se niegan a invertir en el monitoreo cuando las reservas de mineral aún no han sido confirmadas. Como resultado de ello, la recolección de datos hidrometeorológicos y de calidad de aguas se inicia tarde, lo cual causa demoras en el proyecto, revisiones e inconsistencias.

### 3.2 LÍNEA BASE HIDROLÓGICA

La hidrología es un componente importante en los proyectos mineros. Para efectos de esta guía, el término hidrología se refiere a los volúmenes de agua que se presentan sobre la superficie del terreno, y comprende a su vez la escorrentía superficial, los caudales de los cursos de agua, los volúmenes de los cuerpos de aguas lénticas y las condiciones meteorológicas asociadas (i.e., precipitación, evaporación y temperatura del aire).

En un proyecto minero los datos de línea base de hidrología son necesarios para dos propósitos interrelacionados:

- Estudios ambientales: Los datos de línea base permiten la evaluación de los impactos, e.g., mediante modelamiento; así como el monitoreo de los cambios producidos por la implementación de un proyecto. Por otro lado, los datos de línea base de hidrología constituyen un insumo para otros componentes de evaluación de impactos, tales como la calidad de las aguas.
- Diseño de ingeniería: Constituyen la información de partida para el dimensionamiento de las estructuras de manejo de aguas (e.g., cunetas y pozas de drenaje, sistema de drenaje del tajo, suministro de agua, represas, vertederos y estructuras para el control de inundaciones, etc.).

Es una buena práctica preparar un documento único de línea base de hidrología para todos los potenciales usuarios de la información hidrológica. Posiblemente se requiera que los revisores dispongan de un documento general “universal” de línea base de hidrología. En tal sentido, aunque el propósito de este documento es el de proporcionar una guía sobre los aspectos ambientales de los proyectos mineros, se discutirán todos los aspectos relativos a los estudios de línea base de hidrología.

El informe de línea base de hidrología se prepara típicamente al inicio del proyecto y se distribuye a todo el equipo del proyecto para garantizar que todos utilicen información consistente. Es importante haber concluido el desarrollo de los parámetros hidrometeorológicos. Existen diversos usuarios de los datos hidrometeorológicos, y cualquier revisión al informe de línea base tendrá influencia en el trabajo de los diferentes miembros del equipo del proyecto.

En el estudio de línea base de hidrología se deben documentar todos los componentes del balance hídrico de las cuencas involucradas. El balance hídrico de la cuenca representa el balance de todos los componentes de ingreso y salida de aguas en el área de la cuenca.

El principal ingreso de agua procede de la precipitación, la cual depende exclusivamente de parámetros meteorológicos. Otra fuente de ingreso de agua puede

ser la descarga de aguas subterráneas, la cual depende de las condiciones hidrogeológicas.

Las principales salidas de agua comprenden la evapotranspiración real, la infiltración y la escorrentía.

La evapotranspiración real representa las pérdidas de agua hacia la atmósfera desde las superficies libres de agua o desde el suelo (evaporación) o desde las hojas de las plantas (transpiración). En la práctica, es muy difícil distinguir entre evaporación y transpiración, por lo que para efectos de balance hídrico se define el parámetro evapotranspiración para representar de manera colectiva ambos fenómenos. La evapotranspiración real depende de la disponibilidad de agua en el suelo. Por tal motivo, se define también la Evapotranspiración Potencial como la máxima evapotranspiración que ocurriría si el suministro de agua al suelo fuese ilimitado. La evapotranspiración depende de parámetros meteorológicos, como se discute más adelante en este documento.

Otra salida importante la constituye la escorrentía, i.e., el agua que discurre por la superficie del suelo y da lugar a los cursos de aguas superficiales. Si el balance se realiza a escala de una cuenca o subcuenca, toda el agua que discurre será concentrada en un sólo curso de agua<sup>7</sup>. Entonces el caudal de dicho curso de agua puede ser medido tal como se discute más adelante en este documento.

Por otro lado, una parte del agua que ingresa a la cuenca puede infiltrarse en el suelo, lo que da lugar a la infiltración y eventualmente a la recarga de las aguas subterráneas. La infiltración depende de las condiciones del suelo y la hidrogeología.

Finalmente, pueden existir diversos usuarios de captan o descargan aguas a la cuenca. Las captaciones y usos del agua deben ser tomadas en cuenta para efectos del balance de agua y la evaluación de impactos, ya que los usuarios pueden verse afectados por los impactos de la operación. Asimismo, las descargas de agua deben ser consideradas para efectos del balance hídrico y porque pueden constituir fuentes de impactos. En este rubro deben considerarse además los trasvases que pudieran existir, ya sea que extraigan agua de la cuenca o que aporten agua a la cuenca.

Así, el balance hídrico de la cuenca puede estar representado por la siguiente ecuación:

$$P + D + G = ET + I + Q + U$$

donde:

- P: Precipitación
- D: Descargas de usuarios (incluye trasvases)
- G: Descarga de aguas subterráneas
- ET: Evapotranspiración real
- I: Infiltración
- Q: Escorrentía superficial
- U: Usos (captaciones)

<sup>7</sup> A menos que sea captada para su uso. Ver más adelante.

En las siguientes secciones se detallan los requerimientos de información para la caracterización hidrológica.

## 3.2.1 Clima y Meteorología

El clima y la meteorología afectan las condiciones de escorrentía superficial natural. Los parámetros meteorológicos clave son la precipitación, la evaporación, la velocidad y dirección del viento, la temperatura del aire y la radiación solar.

### ***Precipitación***

La precipitación es el parámetro meteorológico más importante en la evaluación de la línea base de hidrología. Se deberá reportar las siguientes características de precipitación:

- Análisis de la lluvia y el derretimiento de nieve. En muchas partes del Perú predomina la lluvia y el término “precipitación” es un sinónimo de “lluvia”. Sin embargo, es posible que ocurra acumulación de nieve o granizo en las montañas. Por ello se requiere un enunciado acerca del estado de la precipitación. Es útil obtener además un registro de la temperatura del aire y las observaciones de los residentes locales.
- La precipitación anual, incluyendo el valor promedio a largo plazo, la desviación estándar, y los estimados de la precipitación anual, correspondientes a diversos *períodos de retorno* (entre 2 y 100 años, para condiciones húmedas y secas).
- La precipitación mensual, incluyendo los valores promedio a largo plazo, las desviaciones estándar y los estimados de precipitación mensual correspondientes a diversos períodos de retorno.
- Un análisis de la época seca y la época húmeda. La duración de la época seca es generalmente importante para dimensionar un reservorio para el suministro de agua.
- La precipitación diaria para diversos períodos de retorno, desde 2 años hasta un evento de Precipitación Máxima Probable (PMP). Los eventos de lluvia extrema son de mayor interés para el diseño de ingeniería que para la evaluación ambiental.
- Los valores de intensidad-duración-frecuencia (IDF) para los eventos de lluvia menores de 24 horas.

La lluvia se mide mediante pluviómetros<sup>8</sup>. Existen dos tipos de pluviómetros: manual y automático (pluviómetros de cubeta basculante).

Los pluviómetros manuales son cubetas graduadas (Foto 3-1). Las ventajas de los pluviómetros manuales consiste en que son económicos (rango de precio entre \$10 y \$150) y los comercializan los proveedores de equipo científico o agrícola. Las desventajas de los pluviómetros manuales es que requieren un personal dedicado para tomar las lecturas y no proporcionan el registro de los eventos de tormenta de corto plazo. Las lecturas de los pluviómetros manuales se toman, por lo general, una o dos veces al día. De este modo, los pluviómetros manuales proporcionan sólo los datos de lluvia de 24 horas y no datos por hora o por minuto.

Los pluviómetros de cubeta basculante están equipados con un colector de lluvia, una cubeta basculante, un sensor que registra los giros de la cubeta y una memoria que almacena los datos (Foto 3-2 y Figura 3-1). Cada giro de la cubeta representa típicamente 0.2 mm de lluvia. De esta manera, estos equipos pueden registrar no solo la precipitación diaria sino además la intensidad de precipitación en períodos cortos.

<sup>8</sup> Una referencia más detallada sobre la medición de parámetros meteorológicos será incluida en una próxima edición del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos del MEM, actualmente en preparación.



## Información de Línea de Base

Los pluviómetros de cubeta basculante pueden ser dispositivos autónomos o parte de una estación meteorológica automática (Foto 3-3).

Los registros de lluvia de la cubeta basculante se pueden utilizar para determinar la intensidad y la frecuencia de la lluvia en el caso de duraciones de lluvia menores de un día (denominadas curvas de intensidad-duración-frecuencia de lluvia o IDF, Figura 3-1). Las curvas IDF de lluvia son comúnmente más utilizadas en el diseño de ingeniería que en los estudios ambientales.

**Foto 3-1 Pluviómetros Manuales**



**Foto 3-2 Pluviómetro Automático**



**Figura 3-1 Mecanismo del Pluviómetro de Cubeta Basculante**

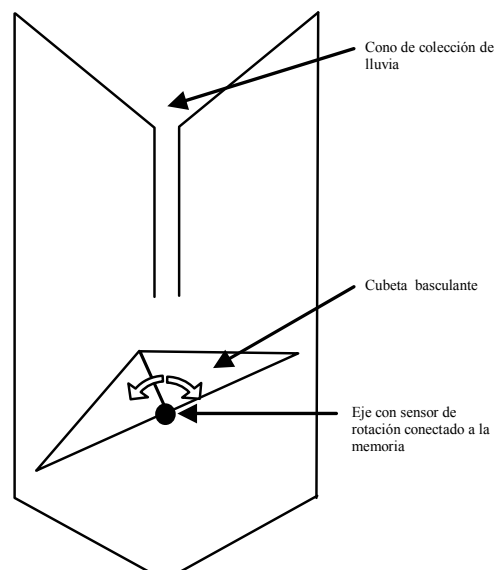


Foto 3-3 Estación Meteorológica Automática



### **Evaporación**

La evaporación es un componente importante en la ecuación del balance hídrico que representa las pérdidas de agua hacia la atmósfera.

Las pérdidas de agua desde una cuenca comprenden la evaporación directa desde las superficies libres de agua (evaporación lacustre), la evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas. En la práctica es muy difícil distinguir entre la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas, por lo que se utiliza el término evapotranspiración para referirse de manera conjunta a ambos fenómenos. La evapotranspiración real está limitada por el suministro de agua al suelo. Por tal motivo se define la evapotranspiración potencial como la máxima tasa de evapotranspiración que ocurriría si el suministro de agua al suelo fuera ilimitado. Una detallada discusión sobre la evapotranspiración y su medición estandarizada es proporcionada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2006).

La evaporación desde una superficie de agua se puede medir con bandejas de evaporación (Foto 3-4), también conocidas como evaporímetros, panevaporímetros o lisímetros. Las bandejas deben ser instaladas adecuadamente. Las mediciones requieren personal correctamente capacitado y una estricta adherencia a los procedimientos de monitoreo<sup>9</sup>. En caso contrario, los resultados podrían ser errados.

Es importante distinguir la evaporación de bandeja de la evaporación lacustre. La bandeja de evaporación es más pequeña que una laguna; se calienta más rápidamente (i.e., absorbe más radiación), y por lo tanto las pérdidas de agua desde la bandeja de evaporación son mayores que desde una laguna. Típicamente, la evaporación lacustre es equivalente a aproximadamente 70% de la evaporación de bandeja. Hacer referencia a la evaporación sin indicar claramente si se trata de evaporación lacustre o evaporación de bandeja es un error común que se presenta en los informes de línea base de hidrología y que puede dar lugar a errores significativos en las predicciones y en los diseños.

<sup>9</sup> Una actualización del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos del MEM se encuentra actualmente en preparación. En dicho documento se detallarán los procedimientos para el monitoreo de variables meteorológicas.

Foto 3-4 Bandejas de Evaporación



También es posible estimar la evaporación y la evapotranspiración desde una superficie del agua a partir de otros parámetros meteorológicos, como la radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa, horas de sol, latitud, etc. Existen diversas ecuaciones que se pueden utilizar. Entre las más difundidas está la ecuación de FAO-Penman-Monteith (FAO, 2006):

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \left( \frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.034u_2)}$$

donde:

- ET<sub>0</sub>: Evapotranspiración referencial (mm/d)
- R<sub>n</sub>: Radiación neta (MJ/m<sup>2</sup>/d)
- T: Temperatura media diaria del aire a 2 m de altura sobre el suelo (°C)
- u<sub>2</sub>: Velocidad del viento a 2 m de altura sobre el suelo (m/s)
- e<sub>s</sub>: Presión de vapor de saturación (kPa)
- e<sub>a</sub>: Presión de vapor real (kPa)
- Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor vs temperatura (kPa/°C)
- γ: Constante psicrométrica (kPa/°C)

La temperatura media diaria del aire es la media aritmética de las temperaturas máxima diaria promedio y mínima diaria promedio. La radiación neta puede ser medida partir de mediciones de radiación de onda corta promedio registradas por un piranómetro o un medidor de radiación neta (Foto 3-5), o puede ser estimada a partir de registros de horas de sol. Actualmente muchas estaciones meteorológicas

automáticas son capaces de registrar todos estos datos y calcular la evapotranspiración.

**Foto 3-5 Piranómetro y Medidor de Radiación Neta**



### **Viento**

En los estudios ambientales, los datos de viento son generalmente necesarios para la evaluación de la calidad del aire (emisión de material particulado, modelamiento de dispersión de contaminantes, etc.) y para los cálculos de la evaporación. Este último es un componente importante de los estudios hidrológicos.

Las características más comunes del viento son velocidad y dirección. La dirección del viento por lo general se reporta en términos de azimut<sup>10</sup> (Figura 3-2). Así,

- 0° representa el viento del norte;
- 90° representa el viento del este;
- 180° representa el viento del sur; y
- 270° representa el viento del oeste.

Obsérvese que la dirección del viento siempre indica de qué lado sopla el viento, no hacia dónde sopla.

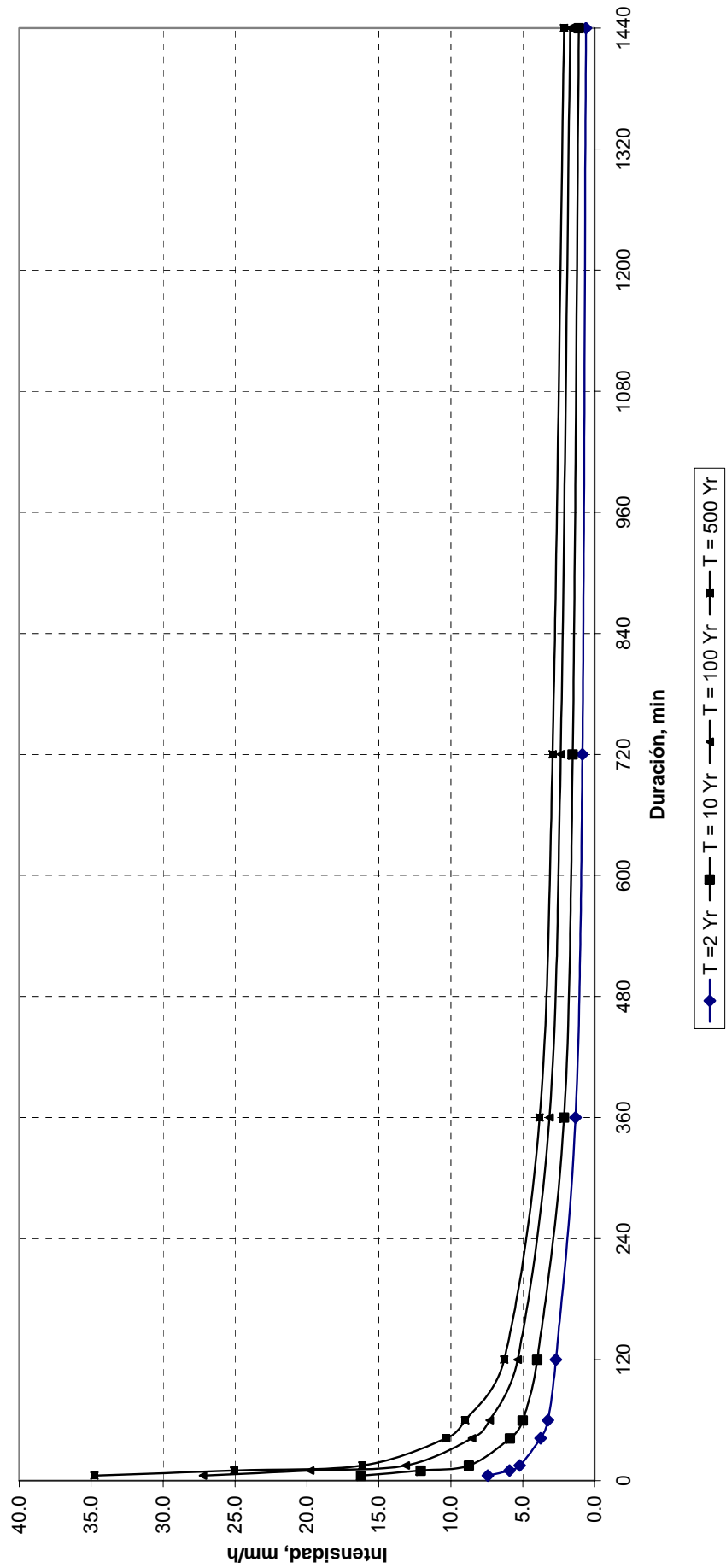
La velocidad y la dirección del viento son medidas con anemómetros. Con frecuencia estos anemómetros cuentan con sensores y están conectados a acumuladores de datos (datalogers) que permiten tener un registro (horario o cada 10 min) continuo de la velocidad y dirección del viento. Estos registros son luego procesados estadísticamente para su uso.

Los datos de velocidad y dirección del viento son usualmente presentados como rosas de vientos, lo que no es otra cosa que un histograma multivariado, donde los datos de velocidad son agrupados por rangos de dirección y rangos de velocidad (Figura 3-2) (Obsérvese que los datos de dirección de viento no pueden promediarse).

La velocidad del viento se incrementa con la elevación sobre la superficie del terreno. Algunas ecuaciones de evaporación requieren viento a una altura determinada (e.g., 2 m sobre la superficie del terreno). Así, para los cálculos que utilizan datos de viento, es importante indicar a qué elevación se encuentra instalado el sensor y para qué elevación de sensor se desarrolló la ecuación.

<sup>10</sup> Grados sexagesimales horizontales medidos desde la orientación norte y en sentido horario.

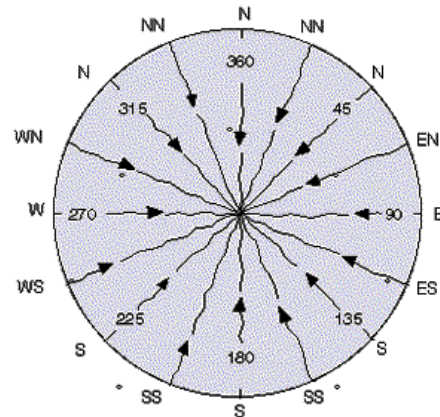
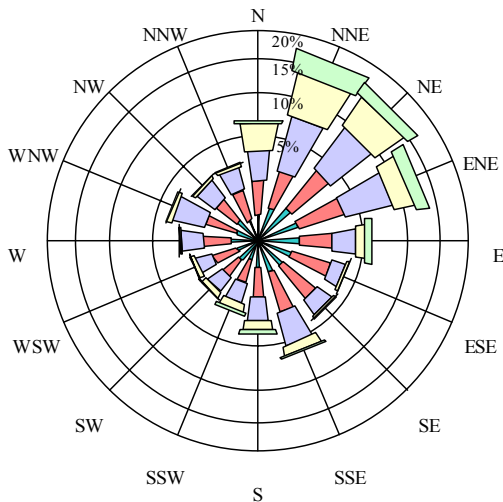
**Figura 3-2 Ejemplo de Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de Precipitación Baffin Island, Canadá**



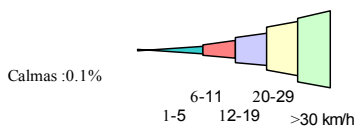
# Información de Línea de Base

**Figura 3-3 Ejemplo del Diagrama de la Rosa de Vientos Estación Meteorológica ESTM-0**

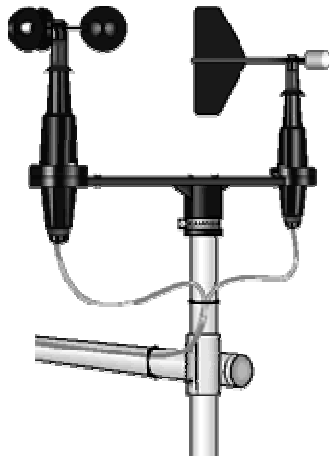
Rango de Velocidad del Viento:	<1 km/h	1-5 km/h	6-11 km/h	12-19 km/h	20-29 km/h	>30 km/h	Velocidad Mínima, km/h	Velocidad Máxima, km/h	Velocidad Promedio, km/h	
	Número de Horas									
Dirección del Viento	N	1	27	109	179	212	33	2.2	37.1	18.1
	NNE	0	45	159	424	493	314	1.1	49.0	21.7
	NE	1	68	241	456	418	171	1.4	48.6	19.1
	ENE	0	66	236	412	243	172	1.1	48.2	18.5
	E	2	63	137	158	79	61	1.4	43.6	16.1
	ESE	0	47	167	90	23	5	1.1	43.9	11.3
	SE	1	39	167	112	20	2	1.1	37.4	11.5
	SSE	1	40	164	232	84	17	2.2	40.0	14.6
	S	1	25	91	123	58	31	1.8	45.0	16.2
	SSW	0	14	56	84	46	20	2.2	44.6	16.7
	SW	0	24	53	72	31	3	1.8	33.5	13.9
	WSW	0	19	66	73	20	3	1.4	34.2	13.1
	W	0	28	88	107	14	1	2.2	31.7	12.1
	WNW	0	21	93	178	33	0	2.2	24.5	13.9
	NW	0	28	78	109	22	1	1.1	51.1	13.0
	NNW	0	19	87	111	22	0	1.4	27.0	13.0



© 1998 Wadsworth Publishing Company/ITP



**Foto 3-6 Anemómetro**



## ***Temperatura del Aire***

La temperatura del aire es un parámetro importante que define las condiciones climáticas y de línea base hidrológica. En los estudios hidrológicos, la temperatura del aire se utiliza para clasificar la precipitación (lluvia vs. nieve) y para calcular la evaporación.

Los datos de temperatura del aire se colectan mediante mediciones directas. Los sensores de temperatura del aire comúnmente se incluyen en las estaciones meteorológicas automáticas utilizadas en las minas. El sensor de temperatura del aire debe estar ubicado en un lugar bien ventilado y protegido de la luz solar directa.

Por lo general, se requieren temperaturas diarias mínimas y máximas para los cálculos de la evaporación. En los climas fríos y altos de las montañas, la temperatura del aire es un indicativo para saber si la precipitación cae como lluvia o se acumula en forma de nieve.

## **3.2.2 Caudales**

La escorrentía superficial y el caudal resultante representan el volumen de agua que es descargado por la cuenca de manera superficial.

En los estudios ambientales, a menudo se requieren datos sobre los caudales para los siguientes propósitos:

- La evaluación del flujo ambiental mínimo;
- La evaluación de los potenciales impactos sociales y ambientales por efecto de las captaciones y derivaciones de agua y otras actividades del proyecto; y
- La evaluación de la escorrentía de determinadas áreas (e.g., botaderos de roca desmonte) para dimensionar un sistema de tratamiento de aguas.

Los diferentes parámetros de caudales pueden ser de interés para diversos usuarios de la información hidrológica. El estudio de línea base de hidrología debe proporcionar información a todos los usuarios potenciales de los datos. Por lo general, se requieren los siguientes parámetros de caudales:

- Caudal promedio anual;
- Caudal bajo;
- Caudal alto;
- Curvas de duración del flujo (FDC); y
- Datos hidrológicos característicos (e.g., inicio y término de la época seca).

## ***Caudal Promedio Anual***

El caudal promedio anual es una característica importante del caudal y de la cuenca. Es un componente de la ecuación del balance hídrico a largo plazo, el cual contribuye a confirmar la correcta comprensión del comportamiento total de la cuenca. Comúnmente se expresa en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), así como en términos normalizados de litros por segundo por kilómetro cuadrado ( $L/s/km^2$ ) y milímetros por año ( $mm/año$ ). Las unidades normalizadas se emplean para comparar la escorrentía de diferentes cuencas. Estas últimas también son comparables con la precipitación, lo cual hace más fácil el entendimiento de la ecuación del balance hídrico.

Se debe presentar un registro histórico de los caudales anuales, la desviación estándar y los estimados de caudales correspondientes a diferentes períodos de retorno.

### **Caudal Bajo**

El caudal bajo es de lejos el parámetro ambiental más sensible. El suministro de agua y la irrigación son de primordial importancia durante la época de caudal bajo, que en algunas partes del Perú puede durar hasta medio año.

En distintos países se emplean diversas mediciones de caudal bajo. Algunos ejemplos de las definiciones de caudal bajo son las siguientes:

**Ontario, Canadá:** 7Q20, que representa un caudal promedio mínimo anual de 7 días con un período de retorno de 20 años.

**British Columbia, Canadá:** 7Q10, que representa un caudal promedio mínimo anual de 7 días con un período de retorno de 10 años.

**Rusia:** Caudal mínimo anual promedio en 30 días consecutivos con un período de retorno de 5 años.

No existe un fundamento científico para la selección de alguna definición particular del caudal bajo. De manera similar a la selección de los eventos de tormenta de diseño, las condiciones de caudal bajo de diseño se establecen ya sea de acuerdo a la reglamentación o mediante un criterio de ingeniería, en consulta con el cliente y los entes reguladores, tomando como base el riesgo asociado y las potenciales consecuencias de fallas. La desventaja de estas definiciones es que toma tiempo explorar los registros diarios históricos para obtener el promedio de los caudales mínimos durante una determinada cantidad de días consecutivos.

Existen variaciones de estos parámetros. Por ejemplo, el caudal promedio mínimo de 30 días (que puede ocurrir, por ejemplo, entre el 17 de julio y el 17 de agosto) a menudo se sustituye por el caudal mensual (digamos, julio o agosto). La ventaja de este enfoque es la simplicidad (los caudales mensuales a menudo se consiguen fácilmente y no requieren exploración de los registros diarios históricos para obtener los caudales mínimos en 7 ó 30 días consecutivos).

Otro parámetro común es el caudal diario mínimo anual que representa el día más seco en un año. Esta es una medida conservadora que indica una profunda recesión del caudal. Los caudales mínimos diarios y mensuales representan un rango al cual corresponderían típicamente los valores de caudal bajo.

Se entiende que en el Perú no existen reglamentos referentes a qué definición de caudal bajo utilizar. En consecuencia, depende del consultor seleccionar una definición representativa de caudal bajo que podría satisfacer al revisor. Un informe global de línea base de hidrología debe contener toda la información necesaria para que los usuarios y los revisores puedan elaborar su propia interpretación y realizar su propia elección.

Si bien los caudales promedio y máximo están controlados en gran medida por la precipitación, el caudal bajo o flujo base está regido por las condiciones hidrogeológicas. Por consiguiente, los hidrólogos e hidrogeólogos del proyecto deberán trabajar estrechamente para evaluar el caudal de la época seca. Típicamente, el hidrólogo define el período de época seca, analiza los datos de caudal



de la época seca y desarrolla el estudio de caudal en campo. El hidrogeólogo interpreta la geología de la cuenca desde la perspectiva del rendimiento hídrico de las diversas formaciones rocosas. Los estimados resultantes de caudal bajo deben ser consistentes tanto con los datos de caudal bajo colectados en campo como con la interpretación de las condiciones hidrogeológicas existentes en la cuenca.

Cuando se desarrolla un modelo hidrogeológico (e.g., para calcular los aportes de aguas subterráneas a los trabajos de minado) se emplean los datos de caudal bajo para la calibración del modelo.

### ***Caudal Alto***

Los caudales altos (i.e., inundaciones) son de gran importancia para los diseñadores e ingenieros de proyecto. Es en base a estos caudales que se deben diseñar las alcantarillas, cunetas, canales de derivación y bermas para garantizar una operación segura.

Las características típicas de caudal alto utilizadas en los proyectos mineros son los caudales máximos con períodos de retorno de 5, 20, 100 y 1000 años, y la Inundación Máxima Probable (Probable Maximum Flood - PMF). La PMF resulta del evento de Precipitación Máximo Probable (Probable Maximum Precipitation - PMP), el evento de precipitación más severo que puede ocurrir físicamente en el área considerando la combinación de las peores condiciones físicas posible de todos los parámetros atmosféricos. El método más comúnmente utilizado para calcular la PMP es emplear un análisis probabilístico de los datos de lluvias.

Los caudales altos son de particular importancia en el diseño de las estructuras para el decantado de los depósitos de relaves y los aliviaderos de demasías. La liberación de aguas de relaves al ambiente puede tener un serio impacto ambiental.

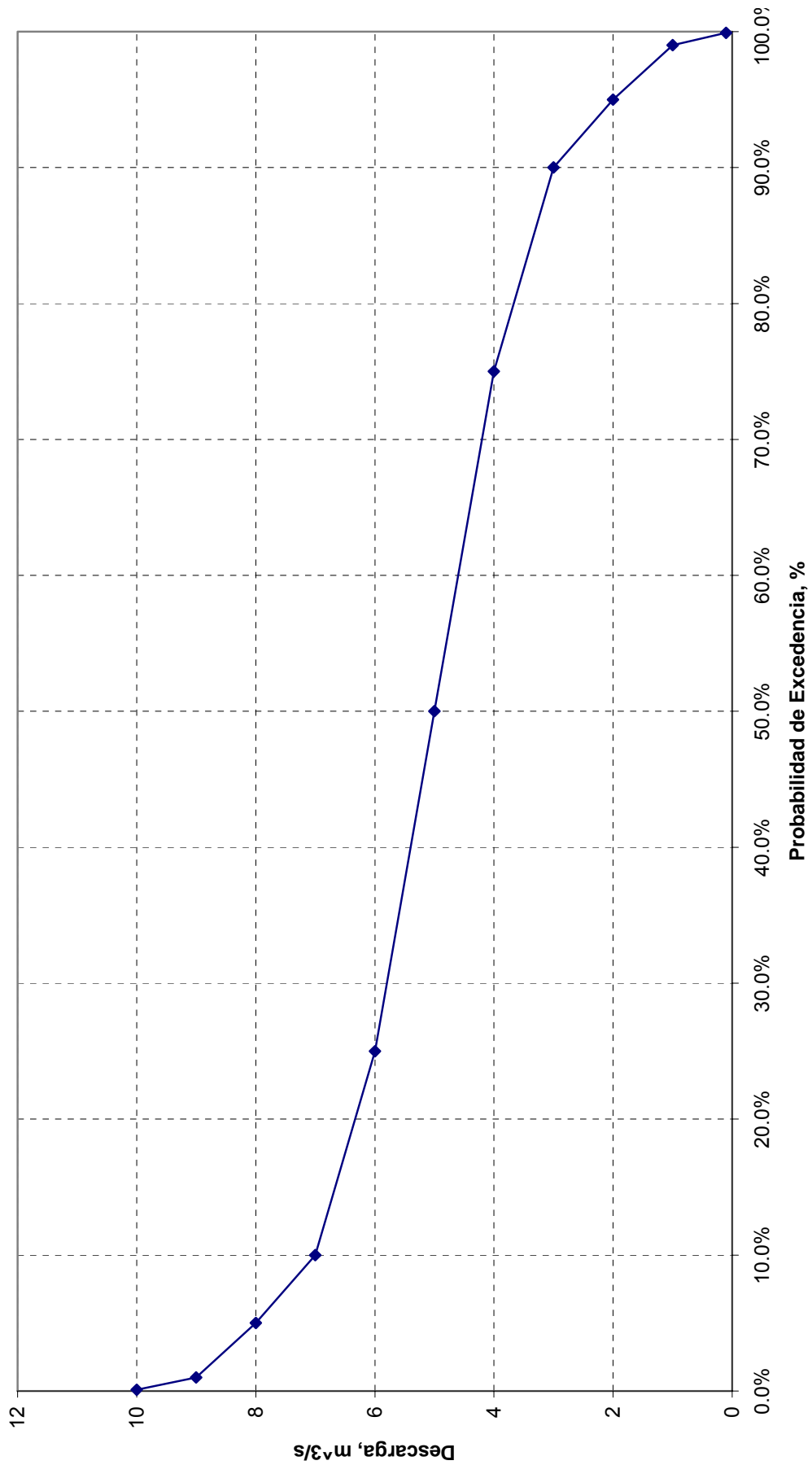
### ***Análisis de la Brecha de la Presa***

Las inundaciones extremas pueden ocasionar la falla de una presa de relaves, lo cual representaría un riesgo para la seguridad de la población que se ubica aguas abajo. Los análisis de la brecha de la presa no son comunes en el Perú, pero son comúnmente requeridos en las presas de Norte América.

El propósito principal del análisis hidráulico de la falla de una presa consiste en determinar el hidrograma de caudales en cualquier ubicación aguas abajo. Las preguntas más típicas a responder basadas en el análisis de falla de la presa incluyen lo siguiente:

- ¿Cuál será el nivel de agua máximo en una ubicación determinada aguas abajo de la presa si ésta fallara? En otras palabras, se requiere delinear sobre un mapa el área de inundación.
- ¿Cuándo ocurrirá el nivel máximo de agua y el flujo máximo en un lugar determinado?
- ¿Cuándo alcanzará el nivel de agua una determinada elevación crítica (tiempo de inundación) y cuándo disminuirá por debajo de esta elevación crítica (tiempo de drenado)? En otras palabras, ¿Durante cuánto tiempo el área estará inundada hasta un determinado nivel en caso de ocurrir una falla de la presa aguas arriba?
- Para las presas de relave, ¿Cuál será la cantidad de relave liberado desde el depósito de relaves y qué distancia viajará el relave?

Figura 3-4 Ejemplo de Curva de Duración del Flujo Diario  
Río Blanco, en el Puesto de Amistad



El análisis de brecha de la presa típicamente comprende dos pasos. El Paso 1, el análisis de brecha de la presa, comprende la evaluación de las dimensiones de la brecha de la presa, el tiempo de falla de la presa y el hidrograma de la inundación que discurre a través de la brecha de la presa. La geometría de la presa y del reservorio, las condiciones geotécnicas, y la hidrología son los datos necesarios para el análisis del Paso 1. El Paso 2, el análisis del movimiento de la inundación, comprende los cálculos hidráulicos de los caudales máximos, las velocidades, los niveles de agua y los tiempos de propagación en el valle aguas abajo de la presa que sufrió una falla. La geometría del valle y el hidrograma de inundación a través de la brecha de la presa del Paso 1 son los datos requeridos para el Paso 2.

El análisis de la brecha de la presa requiere de la aplicación de software especializado. Los programas de cómputo de uso más común son BREACH y FLDWAV, desarrollados por el Servicio Climático Nacional de los EE.UU. (US NWS).

### ***Curvas de Duración del Caudal***

La curva de duración del caudal (Flow Duration Curve - FDC) es una herramienta útil en el análisis de los datos de caudales. Una FDC clasifica el rango completo de las condiciones del caudal, desde los caudales de inundación hasta los caudales de la época seca. Para un valor de caudal determinado, se muestra el porcentaje de tiempo durante un año en el que dicho valor es excedido (Figura 3-4). Esta presentación de los datos de caudal diario ayuda a evaluar los reservorios para el suministro de agua, el plan para la regulación del caudal y el diseño de las derivaciones de caudal, las cuales son en conjunto tareas comunes en los proyectos mineros.

La Figura 3-3 es un ejemplo de un FDC para un río ficticio. En ese río, el caudal de  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  presenta una excedencia de 99% del tiempo (361 días al año), el caudal de  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  se excede 90% del tiempo (328 días al año), el caudal de  $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$  se excede 50% del tiempo (182 días al año) y el caudal de  $7,0 \text{ m}^3/\text{s}$  se excede solamente 10% del tiempo (36,5 días al año).

### ***Duración de la Época Seca***

Las fechas típicas de las fases hidrológicas deben ser presentadas en los informes de línea base de hidrología. La duración de la época húmeda y de la época seca son importantes para la planificación del suministro de agua o el cronograma de descarga de efluentes.

### ***Efectos del Calentamiento Global***

Durante los últimos años se ha convertido en una práctica común el abordar los problemas de calentamiento global en los estudios de línea base de hidrología. Se pueden distinguir dos problemas:

- El impacto potencial del proyecto propuesto al calentamiento global. Esta podría ser una preocupación para proyectos de gran demanda energética que involucren el quemado de grandes cantidades de combustibles fósiles<sup>11</sup>.
- El efecto del calentamiento global en el proyecto.

<sup>11</sup> Generalmente este efecto es de poca importancia en proyectos mineros en el Perú, ya que generalmente el abastecimiento de energía proviene de centrales hidroeléctricas propias o de la red interconectada, donde a su vez la mayor parte de la generación es hidroeléctrica.

La preocupación principal respecto al calentamiento global es que las condiciones hidrológicas pueden empeorar, i.e. los eventos de tormenta se pueden tornar más intensos (por consiguiente, habría una mayor cantidad de inundaciones), la precipitación anual se puede incrementar (por lo tanto, puede presentarse una mayor escorrentía contaminada y requerirse un mayor tratamiento de aguas), la época seca se prolongaría y los caudales disminuirían (la escasez de agua se tornaría más severa).

Estas preocupaciones ha sido analizadas por ejemplo en los estudios de Antamina (Golder, 2007) y Alto Chicama (Golder, 2004) en el Perú. Las opiniones del consultor sobre estos problemas se pueden resumir del siguiente modo:

- No existe acuerdo entre la comunidad científica sobre los efectos a largo plazo del calentamiento global. Existen diversos modelos, algunos de los cuales pronostican precipitaciones cada vez mayores y otros pronostican precipitaciones cada vez menores, como resultado del aumento de las emisiones de gases de invernadero<sup>12</sup>. Incluso la validez de las predicciones de emisión de CO<sub>2</sub> es incierta. Por ejemplo, las publicaciones más recientes sobre el cambio climático hacen una crítica a la metodología mediante la cual el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) ha elaborado sus estimados a largo plazo de emisiones de dióxido de carbono de origen humano para el Siglo XXI (Hayward, 2003). Estas publicaciones argumentan que los pronósticos económicos del IPCC se basan en supuestos económicos fundamentalmente imperfectos que generan una sobreestimación enorme en las futuras emisiones de CO<sub>2</sub>, por lo que el impacto esperado en el balance hídrico por efecto las emisiones de CO<sub>2</sub> sería incluso menos certero.
- Los datos hidrológicos son analizados mediante métodos estadísticos. Estos métodos se basan en la teoría matemática de números aleatorios. Uno de los supuestos clave en los que se basa esta teoría es que los números se generan en condiciones uniformes (i.e., el clima no cambia y las diferencias de los caudales se deben a la naturaleza aleatoria del fenómeno natural). No existe alternativa práctica para que el análisis estadístico calcule los estimados de caudal. Por lo tanto, en nuestra opinión, en un proyecto minero los posibles efectos del calentamiento global se compensarían seleccionando eventos de diseño más extremos que los que se seleccionarían en otro tipo de proyecto (e.g., un período de retorno de 100 años en lugar de 20 años). Este enfoque es más práctico que tratar de determinar teóricamente el cambio anticipado en la precipitación y en la escorrentía en el área del proyecto.

### **El Niño**

El fenómeno de El Niño está asociado con condiciones inusuales de calentamiento de la superficie del agua que ocurren en el Pacífico central y oriental a intervalos periódicos.

Alrededor de la época navideña o cerca del inicio del año, una corriente marítima cálida fluye hacia el sur, a lo largo de las costas de Ecuador y Perú. Por lo general, la corriente persiste hasta fines de marzo, pero en una escala de 2 a 7 años se torna inusualmente cálida y dura hasta 18 meses. Es a este evento principal que se le denomina El Niño. Durante el fenómeno de El Niño, el agua normalmente fría del lado oeste de América del Sur se torna más caliente, mientras que las aguas del Pacífico oriental se vuelven más frías.

En un sentido más amplio, el término El Niño a menudo se aplica a toda la alteración que ocurre en el sistema marítimo-atmosférico, i.e., la Oscilación Austral de El Niño

<sup>12</sup> Principalmente CO<sub>2</sub>, pero también metano, óxido nitroso y otros gases fluorados.

## Información de Línea de Base

(El Niño Southern Oscillation - ENSO). El agua anormalmente caliente combinada con los cambios a gran escala de la presión atmosférica y las direcciones del viento tienen un impacto importante en el clima local de regiones que son normalmente secas. Este fenómeno desata tormentas eléctricas muy activas que pueden culminar, luego de su trayectoria a través del Pacífico, en lluvias fuertemente torrenciales en el Perú, causando inundaciones destructivas.

Por consiguiente, es importante investigar si el fenómeno El Niño afecta las condiciones de lluvia en las áreas del Proyecto en el Perú.

La mayor parte de las investigaciones científicas del fenómeno El Niño las desarrolla la Administración Atmosférica y Oceánica Nacional (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA)<sup>13</sup> de los EE.UU. En el Perú, la investigación sobre el fenómeno El Niño la desarrolla el Instituto Geofísico del Perú<sup>14</sup> y el Instituto del Mar del Perú<sup>15</sup>. La investigación es continua, de manera que los portales electrónicos de estas organizaciones deberán ser visitados oportunamente en búsqueda de información para cualquier proyecto en el Perú.

El impacto potencial de El Niño en las condiciones de lluvia ha sido analizado en los dos estudios citados. El enfoque propuesto por el consultor comprendió lo siguiente:

En base al análisis histórico de temperatura de superficie marina, la NOAA identificó los siguientes períodos de El Niño durante los últimos 20 años: 1986-1987, 1991-1992, 1993, 1994 y 1997-1998. En el caso de una estación meteorológica determinada, se debe comparar la precipitación anual y mensual, así como los eventos extremos de tormenta en estos años, con los del resto de años en los cuales no se presentó el fenómeno El Niño. Inicialmente, debe efectuarse una comparación visual (e.g., la representación gráfica de la precipitación histórica anual o durante el mes de diciembre o enero). De ser necesario, se efectuará una comparación estadística formal de la precipitación en años con El Niño y años sin El Niño. Si los registros de precipitación cerca del área propuesta para el proyecto indican el efecto de El Niño, entonces se deberán analizar en forma individual los registros de precipitación durante los años de El Niño.

Otro indicador del efecto El Niño es el Índice de Oscilación Austral (Southern Oscillation Index - SOI). El SOI se basa en la diferencia de presión atmosférica media mensual a nivel del mar entre Tahití y Darwin, Australia. Una serie de tiempo de la presión media mensual de Tahití menos la de Darwin muestra la oscilación que está estrechamente relacionada con el fenómeno El Niño<sup>16</sup>.

La correlación entre el SOI y la precipitación anual de una estación determinada es un indicativo de la influencia de El Niño. Una alta correlación sería un indicativo que la precipitación en el área del Proyecto es susceptible al fenómeno El Niño. La falta de correlación sería un indicativo que la precipitación en el área del Proyecto no está influenciada por el fenómeno El Niño.<sup>17</sup>

<sup>13</sup> <http://www.noaa.gov/>

<sup>14</sup> <http://www.igp.gob.pe/>

<sup>15</sup> <http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/>

<sup>16</sup> Definición y datos disponibles en <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>

<sup>17</sup> Actualmente la NOAA utiliza también el Índice ENSO Multivariado (Multivariate ENSO Index - MEI), que combina la presión atmosférica al nivel del mar, los componentes zonal y meridional del viento de superficie, la temperatura de la superficie del mar, la temperatura del aire en la superficie del mar y la fracción de cobertura de nubes (<http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/mei.html>).

### 3.2.3 Métodos de Colección de Datos Hidrológicos

Los datos hidrológicos se pueden obtener mediante monitoreo (datos primarios), mediante consulta a fuentes de datos públicas o fuentes bibliográficas (datos secundarios) o mediante la generación de datos sintéticos (modelamiento hidrológico). El monitoreo y el modelamiento hidrológico son temas que exceden el alcance de esta guía. En las siguientes secciones se proporcionan a manera de introducción algunas notas sobre estos temas. Sin embargo, para una mayor discusión de estos aspectos, el lector deberá referirse a fuentes especializadas.

### 3.2.4 Datos Primarios (Específicos del Sitio)

Los datos primarios o datos del área del proyecto son aquellos que son colectados específicamente para el Proyecto. Las ventajas de los datos del área del proyecto son las siguientes:

- El programa de monitoreo (ubicaciones, frecuencia, parámetros, instrumentación) está específicamente diseñado para una determinada área.
- La empresa tiene pleno control y propiedad de los datos así como flexibilidad para modificar el programa, según se requiera.

Las desventajas relacionadas con los datos sobre el área del proyecto son las siguientes:

- El período de registro es típicamente corto, a menudo menos de un año.
- Las empresas mineras no consideran importante los datos hidrometeorológicos, especialmente a inicios del proyecto, cuando las reservas de mineral no están confirmadas y el futuro del proyecto es aun incierto. Por consiguiente, a menudo estos se pasan por alto.
- La complejidad de coleccionar datos confiables, de calidad, se encuentra sub-valorada. Si no se cuenta con el personal capacitado y dedicado, los datos colectados pueden ser erróneos, lo cual crea más confusión para el proyecto y los revisores.
- El programa de monitoreo diseñado por un hidrólogo sin experiencia puede ser deficiente de manera que el estudio concluirá conteniendo vacíos de datos.

El monitoreo hidrológico requerido para la obtención de datos primarios normalmente comprende los siguientes pasos:

- El diseño y la instalación de las secciones de control (puede ser un canal de control, un canal de descarga o un vertedero) (Fotos 3-7 a 3-10).
- La instalación de los sensores de nivel de agua y dispositivos electrónicos de almacenamientos de datos (Foto 3-11).
- Las mediciones de caudal utilizando un flujómetro o correntómetro (Fotos 3-12 y 3-13).
- El establecimiento de la relación entre el nivel de aguas y caudal para una determinada sección transversal (denominada curva de descarga o curva de calibración). Las curvas de descarga se pueden obtener a partir de ecuaciones teóricas (e.g., un vertedero o una canaleta de descarga Parshall) o desarrollarse a partir de mediciones manuales del caudal (Figura 3-5).
- El mantenimiento de la sección de control y de los dispositivos electrónicos de almacenamientos de datos, y la descarga de los datos.

**Foto 3-7 Vertedero con el Área de Control de Gaviones**



FUENTE: Estación SFRN-60 – Río Negro. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Alto Chicama (Golder, 2004).

**Foto 3-8 Vertedero con el Área de Control de Gaviones**



FUENTE: Estación SFCH-60 - Río Chuyuhual. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Alto Chicama (Golder, 2004)

**Foto 3-9 Sección Trapezoidal de Control para Medición de Flujo**



FUENTE: Estación SFLN-40 – Quebrada Laguna Negra. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Alto Chicama (Golder, 2004)

**Foto 3-10 Sección Trapezoidal de Control para Medición de Flujo**



FUENTE: Estación SFQS-30 – Quebrada Quishuara Sur. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Alto Chicama (Golder, 2004)



Foto 3-11 Dispositivos Electrónicos de Almacenamiento de Datos



Foto 3-12 Flujómetro



Foto 3-13 Flujómetro en Suspensión

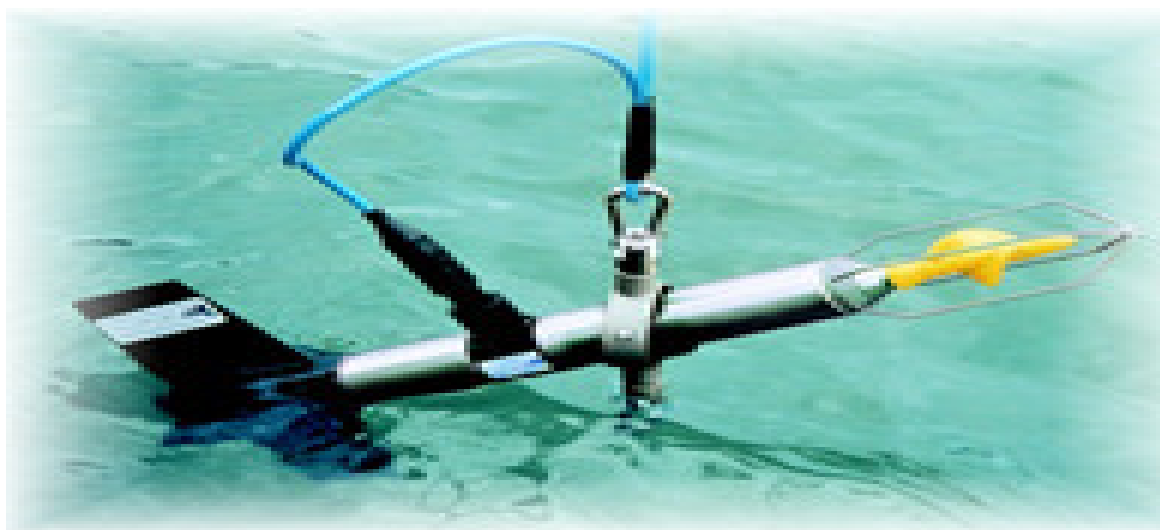
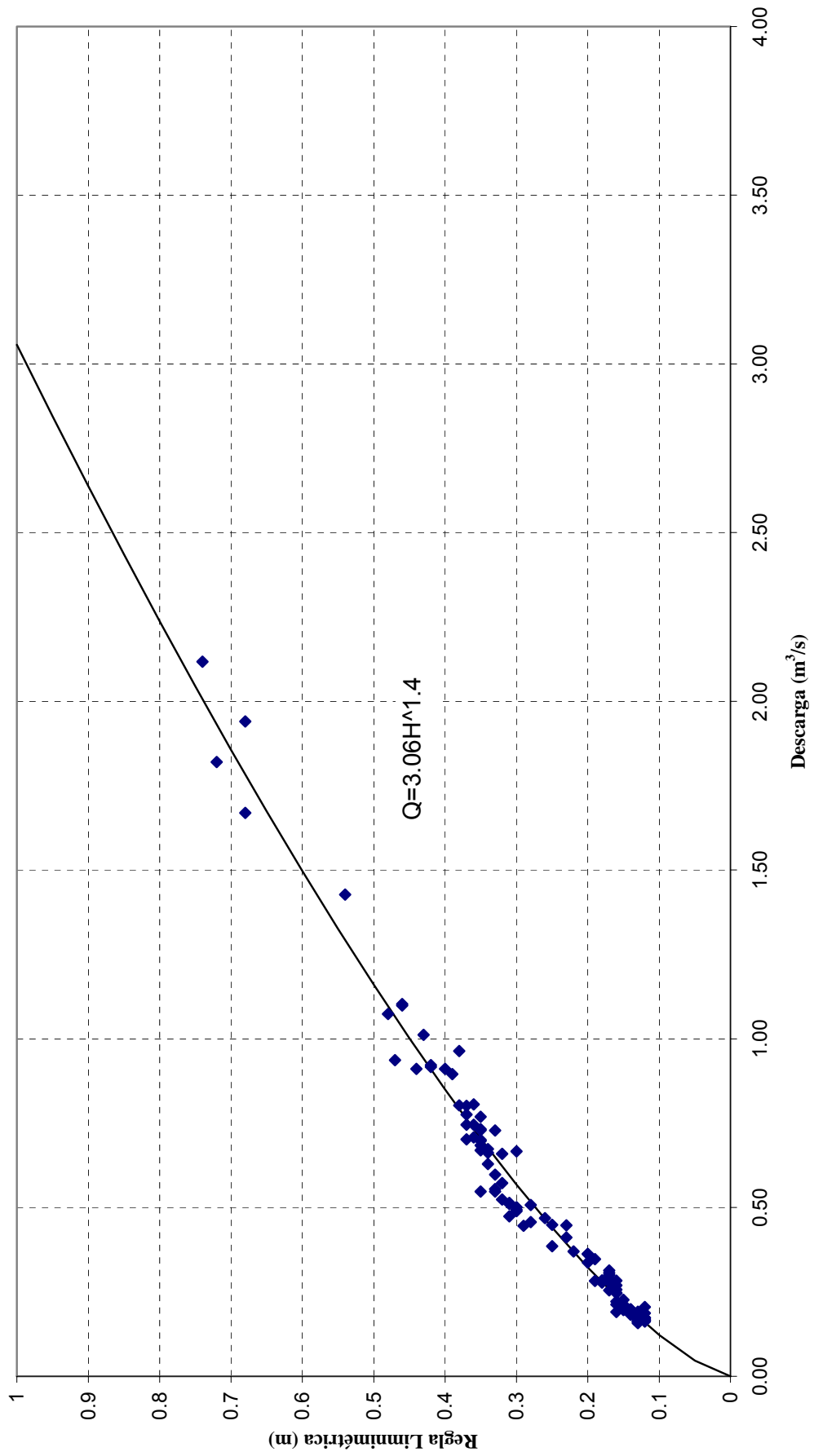


Figura 3-5 Ejemplo de Curva de Descarga



- El procesamiento de datos que comprende el cálculo de flujos instantáneos para cada registro del dispositivo electrónico de almacenamiento de datos y posteriormente el cálculo de los caudales diarios, mensuales y anuales, así como las demás características del caudal antes analizadas (Tabla 3-1).

Los detalles del monitoreo hidrológico serán discutidos en el Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos del MEM, actualmente en preparación.

### ***Datos Secundarios (Regionales)***

Los datos secundarios son generalmente los datos regionales colectados por diversas entidades u otras empresas que podrían ser representativos y útiles para el proyecto. Las fuentes típicas de datos regionales son las siguientes:

- Las entidades gubernamentales responsables de la colección de datos hidrometeorológicos (e.g., SENAMHI).
- Los programas o las publicaciones históricas (e.g., ONERN).
- Las empresas públicas o privadas dedicadas a la generación de energía eléctrica (e.g., Electro Perú), irrigación o agricultura. Estas compañías a menudo mantienen redes de estaciones de monitoreo de caudal o monitoreo meteorológico que podrían proporcionar información de utilidad para el proyecto.
- Otras empresas mineras que operan en el área.

Las ventajas de los datos regionales pueden ser las siguientes:

- Los datos ya existen. Estos proporcionan un buen punto de inicio y de referencia para la clasificación de las condiciones existentes en el área del proyecto.
- El registro de monitoreo puede ser extenso (muchos años o décadas, especialmente en el caso de los datos del SENAMHI).
- Se asume que la entidad involucrada en la colección y reporte de datos tiene instalados sistemas de control de la calidad (observadores capacitados, equipo calibrado, análisis de datos y comparación con otras estaciones antes de la publicación).
- Aceptación de los datos por parte de los entes reguladores. Se espera que los datos que reporta el SENAMHI o Electro Perú sean correctos (en realidad podría no ser siempre el caso).
- En algunos países, es importante el otorgamiento de autorizaciones, incluyendo una para monitorear y reportar los datos hidrometeorológicos.

Las desventajas de los datos regionales pueden ser las siguientes:

- Las estaciones regionales pueden encontrarse alejadas del proyecto o ubicadas en diferentes elevaciones. Este es por lo general el caso de los Andes peruanos.
- Los problemas potenciales de propiedad (e.g., una empresa minera puede no desear divulgar sus datos a la competencia). El costo de adquisición de los datos se puede negociar.
- Los problemas potenciales de responsabilidades (si un fenómeno de clima extremo causa daños significativos a la propiedad, una empresa que emplea los datos podría querer responsabilizar a la empresa que los proporcionó).

## Información de Línea de Base

**Tabla 3-1 Ejemplo de Resumen de Flujo Diario Promedio – (Área de Drenaje = 9,8 km<sup>2</sup>)**

Día	Dic-02	Ene-03	Feb-03	Mar-03
1		0,362	1,455	0,421
2		0,304	2,745	0,412
3		0,337	1,305	0,570
4		0,329	0,753	0,517
5		0,256	0,490	0,477
6		0,234	0,390	0,402
7	0,577	0,217	1,131	0,340
8	0,489	0,215	1,142	
9	0,326	0,180	0,382	
10	0,232	0,191	0,294	
11	0,195	0,212	0,255	
12	0,224	0,200	0,196	
13	0,230	0,166	0,221	0,373
14	0,230	0,159	0,573	0,496
15	0,260	0,147	0,366	0,463
16	0,246	0,139	0,289	0,510
17	0,219	0,161	0,247	0,446
18	0,212	0,138	0,215	0,596
19	0,233	0,126	0,197	0,398
20	0,268	0,125	0,192	0,325
21	0,315	0,130	0,243	0,276
22	0,261	0,127	0,246	0,259
23	0,410	0,117	0,219	0,357
24	0,272	0,112	0,194	0,370
25	0,254	0,200	0,166	
26	0,266	0,334	0,152	
27	0,431	0,518	0,186	
28	0,634	0,447	0,209	
29	0,563	0,355		
30	0,453	0,312		
31	0,434	0,964		
<b>Promedio</b>	0,329	0,252	0,516	0,422
<b>Máximo</b>	0,634	0,964	2,745	0,596
<b>Mínimo</b>	0,195	0,112	0,152	0,259
<b>Estadísticas para Registro Continuo entre el 7 de diciembre de 2002 y el 24 de marzo de 2003</b>				
<b>(No se cuenta con datos del 8 al 12 de marzo de 2003)</b>				
<b>Promedio</b>	0,373	m <sup>3</sup> /s		
<b>Máximo</b>	9,880	m <sup>3</sup> /s	7 de Febrero de 2003 (19:15)	
<b>Mínimo</b>	0,107	m <sup>3</sup> /s	24 de Enero de 2003 (14:05 a 18:00)	

FUENTE: Estación Río Negro, SFRN-60. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Alto Chicama (Golder, 2004).

### **Datos Sintéticos**

Cuando no se dispone de suficientes datos de campo o de información secundaria en un área de estudio determinada, es posible generar datos sintéticos a partir de modelos matemáticos y datos históricos de estaciones cercanas pertenecientes a la misma cuenca o estaciones que se ubiquen en cuencas de condiciones similares.

Algunas de las técnicas que se pueden utilizar para generar datos sintéticos son:

- Generación de caudales pico a partir de la síntesis de hidrogramas. Los histogramas unitarios sintéticos pueden ser obtenidos en base a la estimación del tiempo de retardo de la cuenca y el caudal pico a partir de datos de la geometría de la cuenca, o por transposición de hidrogramas unitarios de cuencas similares.
- Síntesis de hidrogramas en base a métodos de tránsito de avenidas.
- Generación de datos mediante técnicas de simulación.
- Métodos probabilísticos

La aplicación de estas técnicas generalmente requiere de la ayuda de modelos hidrológicos, los cuales son presentados y discutidos más adelante en la Sección 4.

### 3.2.5 Usos y Usuarios del Agua

#### ***Caudal Natural vs. Caudal Regulado***

La comprensión de los usos y los usuarios del agua existentes alrededor del proyecto minero es esencial para el estudio de la línea base de hidrología.

Al revisar los datos regionales, es importante efectuar anotaciones sobre si el caudal en la estación de monitoreo es natural o regulado. Por ejemplo, si la estación de caudal corresponde a una represa hidroeléctrica, entonces los caudales que se reportan representan condiciones de flujo regulado en lugar de flujo natural. De particular importancia para los estudios ambientales en las áreas áridas, como la mayor parte del Perú, son las tomas de agua para irrigación. El registro de monitoreo puede representar el caudal luego de haber derivado una porción significativa del agua. La aplicación de estos datos al área del proyecto, en donde tales derivaciones no existen, puede ocasionar una interpretación equivocada.

### 3.2.6 Otras Minas en el Área

La experiencia de las minas operativas en el área puede ser útil para la evaluación de las condiciones de línea base hidrológica. Es posible que estas minas dispongan de registros de monitoreo de parámetros hidrometeorológicos, así como de experiencia práctica relacionada con los retos del suministro de agua. Como se mencionó anteriormente, es posible que parte de esta información sea privada y no se encuentre disponible.

### 3.2.7 Aseguramiento y Control de la Calidad (QA/QC) de los Datos de Línea Base Hidrológica

Los observadores de los datos hidrológicos por lo general son técnicos de mina con poca o ninguna formación en hidrología y meteorología. Ellos normalmente colectan los datos pero generalmente no los procesan ni interpretan.

Los datos colectados se archivan hasta que un hidrólogo los evalúa para elaborar el informe de línea base de hidrología. Por consiguiente cualquier error en la colección de datos podría no ser detectado durante períodos extensos. Al momento de la elaboración del informe de línea base de hidrología, se requiere efectuar un examen exhaustivo para separar los datos buenos y confiables de los datos incorrectos.

La inspección y el análisis de los datos dependen en gran parte de la experiencia del hidrólogo del proyecto. Considerando que no existen procedimientos estrictos de QA/QC para el análisis de datos, a continuación se proporciona algunas sugerencias.

### ***Sentido Común***

Se recomienda utilizar métodos simples de análisis en lugar de los métodos científicos y complejos, siempre que sea apropiado. Existen métodos complejos, altamente especializados de interpretación de datos hidrológicos. Los hidrólogos calificados pueden y deben emplear estos métodos siempre que sea necesario, pero ante todo deberán aplicar métodos simples y comprensibles para a una audiencia amplia de lectores potenciales (revisores internos, revisores gubernamentales, ingenieros de proyecto y otros usuarios de la información). Por ejemplo, la representación gráfica de los datos históricos proporciona la primera impresión de las tendencias, los valores atípicos presenciales y los errores obvios en el registro de los datos.

La Figura 3-6 ilustra los registros históricos de lluvia anual en diversas estaciones meteorológicas. Como se puede observar en esta figura, el registro de precipitación en Quiruvilca (datos del SENAMHI) parece ser incorrecto. Es improbable que la lluvia anual cambie de aproximadamente 200 mm/año (en 1974) a aproximadamente 3 700 mm/año (en 1993). Los registros de Quiruvilca (ONERN) y Shorey (PanAm Silver) parecen ser más razonables.

Los métodos estadísticos de tendencias o los valores atípicos comprobables no son entonces necesarios, considerando que cualquier lector se encuentra satisfecho con la ilustración gráfica. Por ejemplo, la figura citada ilustra que Quiruvilca (ONERN) y Shorey (PanAm Silver) son nombres diferentes para el mismo pluviómetro (en 1964, la empresa minera tomó el control del pluviómetro, pero el pluviómetro propiamente dicho se mantuvo instalado).

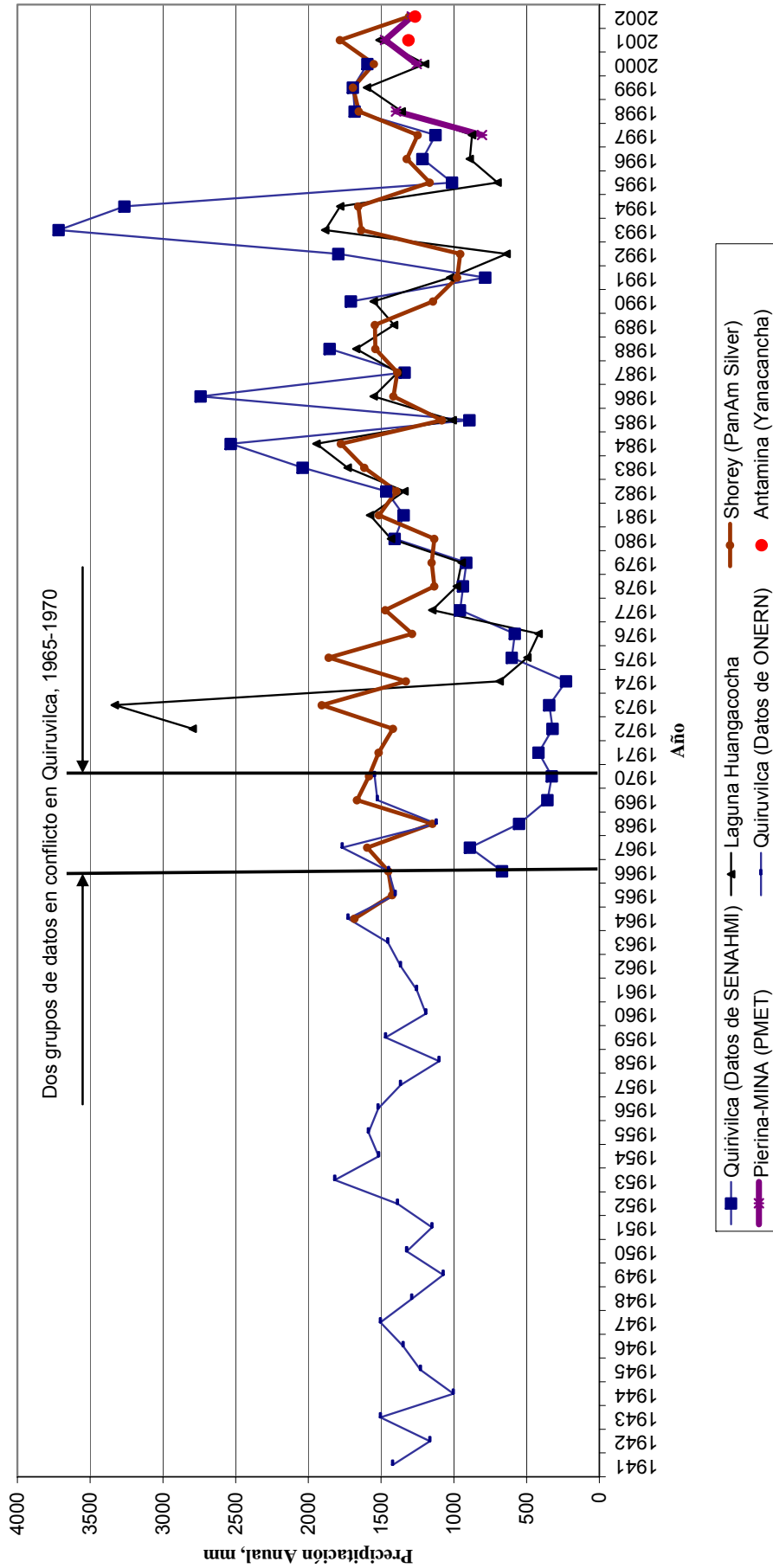
### ***Unidades de Medición***

Por lo general, los datos meteorológicos se miden y registran directamente en las estaciones meteorológicas y los sensores se encuentran generalmente en buenas condiciones. Un problema común con los datos son las unidades de reporte. Por ejemplo, durante la elaboración de los estudios del proyecto Alto Chicama en el Perú, los consultores observaron que en una de las estaciones las unidades de reporte de lluvia fueron cambiadas de milímetros a pulgadas a la mitad del año, sin mediar explicación alguna (ver Anexo A).

### **3.2.8 Balance Hídrico**

El balance hídrico de la cuenca ofrece una buena verificación de los estimados hidrológicos y debe ser presentado y explicado en términos simples y en unidades consistentes. Por ejemplo, la precipitación, la evaporación y la escorrentía anual se calculan empleando métodos independientes y se presentan generalmente en diferentes secciones del informe de línea base de hidrología. Asimismo, la precipitación y la evaporación se expresan en mm/año mientras que la escorrentía se expresa en  $m^3/s$  o  $L/s/km^2$ . Una discrepancia importante entre los datos reportados puede pasar desapercibida si el balance hídrico no se analiza de manera específica.

Figura 3-6 Ejemplo del Gráfico de Precipitación Anual Histórica



Por ejemplo, en el reciente informe de línea base de hidrología para una mina en Rusia, la precipitación anual se reportó en aproximadamente 500 mm/año, la evaporación anual se reportó en aproximadamente 270 mm/año y la escorrentía anual se reportó en aproximadamente 25 L/s/km<sup>2</sup>. Se emplearon los métodos complejos del análisis de regresión múltiple para obtener estos estimados. Cada sección del informe era independiente de otras secciones y pareció ser un tratamiento altamente científico de los datos disponibles. El balance hídrico no fue presentado en el informe.

Una simple conversión de unidades demostró que 25 L/s/km<sup>2</sup> equivalen a aproximadamente 788 mm/año<sup>18</sup>. El autor del informe no fue capaz de explicar de qué manera 500 mm de precipitación podría producir 787 mm/año de escorrentía luego de una evaporación de 270 mm/año. La presentación de los datos en unidades consistentes así como prestar atención al balance hídrico contribuyó a identificar un error significativo en los registros de caudal.

### 3.2.9 Curvas de Descarga

Se debe inspeccionar la curva de descarga de la sección transversal del curso de agua para entender la exactitud de los datos de caudal reportados. Las curvas de descarga se desarrollan mediante mediciones manuales de caudal. Estas cubren un determinado rango de caudales y de niveles de agua. Los hidrólogos de campo tienen como objetivo realizar mediciones manuales del caudal en condiciones de caudal bajo, caudal promedio y caudal alto tratando de cubrir el mayor rango de condiciones de caudal que sea posible. Es virtualmente imposible, no obstante, cubrir el rango completo de las condiciones del caudal (las mediciones manuales deben efectuarse en situaciones de caudales máximos y mínimos y las probabilidades de encontrarse en las estaciones de monitoreo en estos momentos son muy reducidas). Las curvas de descarga, por consiguiente, son extrapoladas más allá del rango de los caudales medidos. Existe mucha incertidumbre relacionada con la extrapolación de la curva. Cuanto mayor es la extrapolación, menos confiables son los caudales calculados. Por consiguiente, una evaluación de la curva de descarga y del rango real de las fluctuaciones de nivel en el curso de agua es un indicativo de la confiabilidad de los datos de caudal.

La Figura 3-5 muestra una curva de descarga típica extrapolada más allá del rango de los caudales medidos.

## 3.3 LÍNEA BASE DE CALIDAD DE AGUA

Los datos de línea base de calidad de aguas son necesarios para:

- Tener un punto de referencia a partir del cual comparar los efectos de las operaciones y de las obras de cierre sobre la calidad de las aguas del entorno.
- Alimentar y calibrar los modelos numéricos de predicción de la calidad de las aguas.

La calidad de agua es siempre un aspecto crítico en los proyectos mineros. Debe tenerse presente que la línea base de un estudio ambiental está relacionada a un

<sup>18</sup>  $25 \frac{L}{s - km^2} \left( \frac{10^6 mm^3}{L} \right) \left( \frac{km^2}{10^{12} mm^2} \right) \left( \frac{3600s}{h} \right) \left( \frac{24h}{d} \right) \left( \frac{365d}{año} \right) = 788.4 mm / año$



proyecto específico; por lo tanto, no debe recopilarse información indiscriminadamente, sino aquella que esté relacionada al proyecto a evaluar.

No obstante, es recomendable que la línea base de calidad de agua incluya no solamente la información necesaria para poder realizar un control efectivo de los cambios en la calidad del agua debidos al proyecto, y poder así realizar la evaluación de impactos; sino que además debe tomar en cuenta los aspectos relacionados a la percepción que tiene el proyecto por parte de la población. Es una buena práctica incluir aspectos de preocupación de la población, a pesar que desde el punto de vista técnico no se considere necesario.

### **3.3.1 Consideraciones para la definición de la línea base de calidad de aguas**

Entre los aspectos más importantes que deben tomarse en cuenta, además de la definición del alcance espacial y temporal (véase la Secc. 3.1) se deben mencionar:

#### ***Cuerpos de Agua***

No todos los cuerpos de agua requieren ser caracterizados químicamente en una línea base. Los cuerpos de agua importantes que deben ser considerados son aquellos que:

- Serán utilizados como fuentes de agua (para el proyecto y por la población);
- serán afectados por construcción y operación del proyecto;
- recibirán descarga de efluentes; y
- son importantes económica y/o culturalmente para la población.

#### ***Tipo de Operación***

Es importante tener en cuenta el tipo de operación, ya que puede afectar la lista de parámetros o la frecuencia de monitoreo. Los parámetros a ser considerados se discuten más adelante.

#### ***Tipos de Usuarios***

La línea base debe considerar los diversos tipos de usuarios. Diferentes usuarios tienen distintos requerimientos de calidad. Además, los requerimientos pueden ser diferentes dependiendo de la estación del año.

Un caso típico son los usuarios de canales. Por lo general, los canales son alimentados por el agua de ríos principales, de donde se distribuye a los terrenos de cultivo. Es práctica general que durante época de lluvia o épocas transicionales, estos canales no sean usados. En esta época se prefiere en caso de no haber lluvias, aguas provenientes de quebradas pequeñas u ojos de agua, aguas que son consideradas más limpias. En época de estiaje, cuando estas fuentes de aguas se secan, entran en funcionamiento las tomas de los canales desde los ríos principales. Resulta pues evidente que la línea base debe considerar estos cambios en el uso del agua.

### 3.3.2 Criterios para Preparación de la Línea Base de Calidad de Agua Superficial

El Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua del MEM presenta información sobre la toma de muestras, instrumentos, tipos de muestreo, preservación de muestras y QA/QC de muestreo. En esta guía se discutirán solamente ciertos temas que son recurrentes en los informes ambientales. Asimismo se desarrollará en esta sección el control de calidad, una vez que se obtienen los resultados del laboratorio.

#### **Parámetros**

La lista de parámetros a considerar para la línea base depende de muchos factores. Sin embargo, en el caso de una línea base con fines de evaluación de impacto ambiental, es aconsejable tomar como referencia los ECA de Aguas como primera referencia para la preparación de la lista de parámetros en el caso de agua superficial (ver Sección 2.1). Otros factores importantes son las características específicas del proyecto, el uso de algún reactivo especial en el proceso, o algún elemento característico debido a la geología del sitio o a otras actividades que se presentan en el entorno del proyecto.

Como se ha indicado, también es recomendable tener en cuenta las percepciones de las poblaciones cercanas. Los parámetros que pueden ser incluidos se recogen de los talleres informativos previos y debe ponerse atención a las preocupaciones de la población.

#### **Frecuencia y Duración**

La frecuencia y duración del monitoreo depende del desarrollo del proyecto. Siempre es recomendable iniciar la línea base lo antes posible y obtener información del período más largo posible antes de iniciar las operaciones. De esta manera es posible registrar las variaciones estacionales en la calidad de agua.

Comúnmente los proyectos poseen una caracterización inicial de los cuerpos de agua, la que ha sido obtenida durante la fase de exploración para la obtención del permiso correspondiente. Sin embargo, en la mayoría de los casos se trata de un evento puntual y no de un programa de monitoreo; o bien, se limita a un área muy reducida. El monitoreo con fines de preparación de la línea base se inicia posteriormente y tiene un alcance diferente.

La duración de la línea base debe ser tal que permita registrar los cambios estacionales a lo largo del año. Por lo tanto, es recomendable que la línea base tenga una duración de por lo menos un año y que caracterice tanto la calidad de las aguas durante la época de estiaje como durante la época de lluvias. En el caso de las zonas altas, un evento importante que debe ser registrado es el efecto de las primeras lluvias en la calidad de las aguas de ríos y quebradas. Las primeras lluvias fuertes del año, que ocurren normalmente entre setiembre y octubre, recogen los elementos acumulados en los suelos durante la época de estiaje y los llevan a los cursos de agua. Este fenómeno de "lavado" tiene como consecuencia que la concentración de los diferentes parámetros aumenta de manera significativa; alcanzándose en ciertos casos los valores máximos en el año.

La frecuencia debe permitir observar los cambios a lo largo del año. Un monitoreo trimestral es la frecuencia mínima para poder lograr esta caracterización. Sin

embargo, debe tenerse cuidado en las fechas de los monitoreos, las cuales deben coincidir con los picos de las épocas de lluvia y estiaje.

### 3.3.3 Evaluación de Resultados de Línea Base de Calidad de Agua

Una vez obtenidos los resultados, existen muchas maneras de presentar los resultados. Generalmente se generan tablas con todos los resultados, tal como se muestra en la Tabla 3-2. En este caso se preparan tablas por punto, indicando los parámetros y los resultados de los diferentes monitoreos.

Cuando se ha llevado a cabo un monitoreo por un período largo, este tipo de tabla puede ser poco práctica para obtener una visión de las características del lugar. En este caso se preparan tablas resumen, donde se calculan valores estadísticos como número de muestras, valores máximos, mínimos y promedios. En algunos casos se pueden calcular medianas o percentiles.

Las medianas se utilizan cuando los valores sufren mucha variación, y el promedio se ve influenciado por valores extremadamente bajos o extremadamente altos. La mediana sin embargo, no se ve alterada por estos puntos extremos.

Los percentiles se utilizan para determinar si un porcentaje importante de los valores sobrepasa algún valor específico. Por ejemplo, puede ser que un monitoreo detecte que en un punto no cumple con algún ECA todo el tiempo. Sin embargo, puede tratarse de un solo valor. Los percentiles permitirán indicar si se trata de algunos pocos valores que sobrepasan el ECA y no de un comportamiento regular.

Las tablas son por lo general difíciles de interpretar; mientras que los gráficos pueden ofrecer información visual y hacer más fácil la interpretación. En las siguientes secciones presentaremos los gráficos y diagramas más comunes.

#### **Gráficos de Concentración vs Tiempo**

Este tipo de gráfico muestra el desarrollo de las concentraciones de los parámetros a lo largo del año. Con la ayuda de estos gráficos se pueden establecer rápidamente patrones o incluso algunos errores analíticos, por lo que deben ser siempre preparados.

En el ejemplo mostrado en el gráfico siguiente muestra las concentraciones de STS y STD a lo largo del año hidrológico. Se han incluido en la gráfica los valores de flujo para representar el efecto de los flujos en las concentraciones.

El gráfico muestra claramente el efecto de las primeras lluvias. Los sólidos totales disueltos aumentan durante el período de estiaje, ya que no existe el efecto de dilución producido por el agua de lluvia. Con las primeras lluvias en noviembre los sólidos totales disueltos disminuyen. Por el contrario los sólidos totales suspendidos muestran una concentración muy baja durante la época de estiaje; mientras que el valor aumenta con la presencia de lluvias.

Otro ejemplo presenta las concentraciones de las fracciones disueltas y suspendidas de zinc y hierro a lo largo del año.

Tabla 3-2 Tabla General de Resultados

Descripción de Parámetros	Fecha de Muestreo																
	2002-10-28	2002-11-22	2002-12-20	2002-12-27	2003-12-01	2003-01-16	25/01/2003	2003-01-02	2003-02-21	2003-02-28	2003-06-03	2003-03-21	2003-03-29	2003-11-04	2003-04-26	2003-03-05	2003-10-05
Conductividad Campo, uS/cm	398	261	285	228	228	239	263	223	227	222	234	208	242	195	209	211	190
Conductividad Laboratorio, uS/cm	349	267	261			258			223			214		225			
Flujo, l/s	1496.44	1762.69		4512.18	4512.18	4764.71	4665.6			9324.72			9737.82			7600.36	8665.18
Oxígeno Disuelto (como O <sub>2</sub> ), mg/l	7.38	5.92	3.5	3.48	3.48	3.15	3.83	2.95	1.84	1.98	2.73	2.42	2.46	2.2	2.13	2.31	2.39
pH Campo (unidades de pH)	8.05	7.75	7.71	7.49	7.49	7.72	7.21	7.14	7.58	7.7	7.76	7.67	7.81	7.46	6.88	6.82	6.83
pH Laboratorio (unidades de pH)	7.84	8	7.96			8.08			8.07			7.77		7.36			
Presión Barométrica, mm of Hg	654.4	647.3	647.5	626.9	626.9	647.7	636.7	633.2	645.9	469.3	633.9	647.9	645.3	646.4	643.4	644.1	648.7
Sólidos Totales Disueltos (Conductímetro), mg/l	282	193	210	157	157	117	190	160	166	165	160	162	175	147	154	151	147
Temperatura del Agua, Campo (Grados Centígrados)	16.68	18.3	18.9	16.87	16.87	18.66	16.58	20.27	18.34	18.2	19.59	16.01	19.63	18.23	18.77	17.59	16.6
Temperatura del Aire (Grados Centígrados)	18	20	22	10	17	22	17	17	22	24	22	18	19	21	18	17	15
Coliforme Fecal, NMP/100ml	800	1700	700			80			1300			300		30000			
Coliforme Total, NMP/100ml	3000	1700	1100			130			3000			800		30000			
Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD <sub>5</sub> ), mg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2			< 2			< 2		< 2			
Sólidos Disueltos, mg/l	246	182	174			173			158			134		146			
Sólidos Suspendedos, mg/l	2136	4410	405			< 5			1250			2140		12408			
Fósforo Total (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P), mg/l						0.14											
Nitratos (NO <sub>3</sub> ), mg/l	0.24	0.17	0.11			0.07			0.17			0.2		0.17			
Nitrógeno Amoniaco (NH <sub>3</sub> -N), mg/l						< 0.05											
Alcalinidad Bicarbonato (como CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	74.3	67.8	72.9			75.6			62.9			65		55.7			
Alcalinidad Carbonato (como CaCO <sub>3</sub> ), mg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			1			< 1		< 1			
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> ), mg/l	3.2	< 1	2.3			2.1			< 1			< 1		1.5			
Fluoruros (como F <sup>-</sup> ), mg/l						0.09											
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ), mg/l	102	61.3	49.1			52.8			45.5			39.4		53.7			
Calcio Total (como Ca), mg/l	13.04	18.48	27.9			32.96			12.57			11.24		4.92			
Magnesio Disuelto (como Mg), mg/l	11.68	8.62	7.7			7.44			6.19								
Magnesio Total (como Mg), mg/l	23.24	21.63	10.21			8.5			10.15			14.79		30.9			
Potasio Total (como K), mg/l	7.93	10.31	1.84			1.29			3.03			4.32		13.25			
Sodio Total (como Na), mg/l	6.94	6.3	4.78			5.11			4.26			5.09		6.7			
Fenoles, mg/l						< 0.1											
M.E.H., mg/l	< 5	< 5	< 5			< 5			< 5			< 5		< 5			
S.A.M., mg/l						< 0.05											
Aluminio Disuelto (como Al), mg/l	< 0.15	< 0.15	< 0.15			< 0.15			< 0.15			< 0.15		< 0.15			
Aluminio Total (como Al), mg/l						1.92						1.94		105.71			
Antimonio Disuelto, mg/l						< 0.01											
Antimonio Total, mg/l						< 0.01											
Arsénico Total (como As), mg/l	0.02424	0.06299	0.00457			0.00479			0.01138			0.01821		0.23045			
Arsénico Disuelto (como As), mg/l	0.0014	0.00085	0.00129			0.00189			0.00096			0.00111		0.00095			
Bario Disuelto, mg/l						< 0.1											

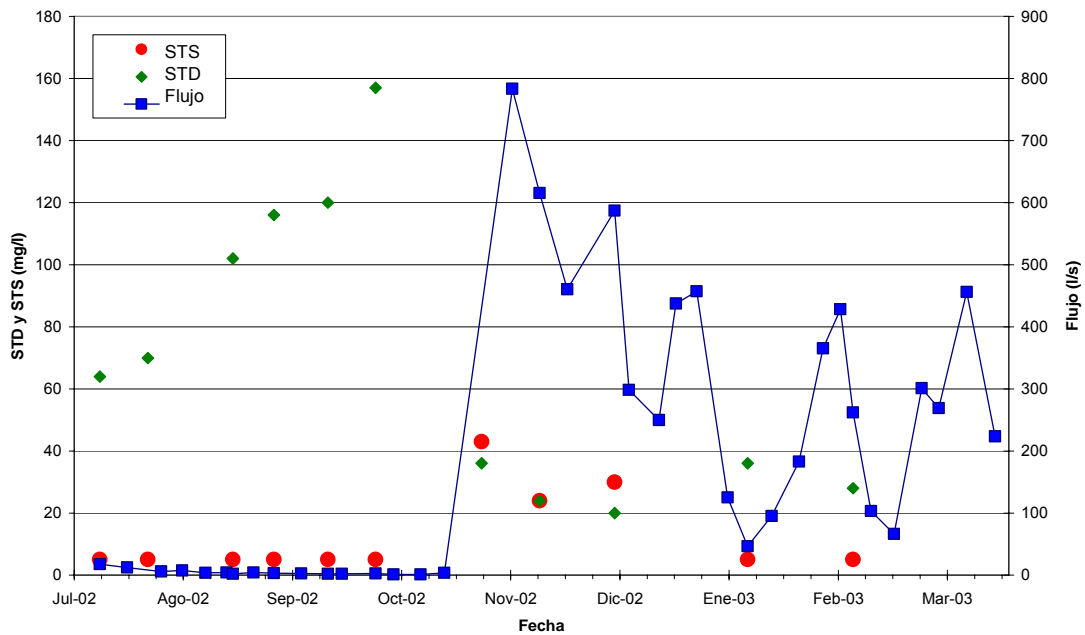
# Información de Línea de Base

Tabla 3-2 Tabla General de Resultados (continuación)

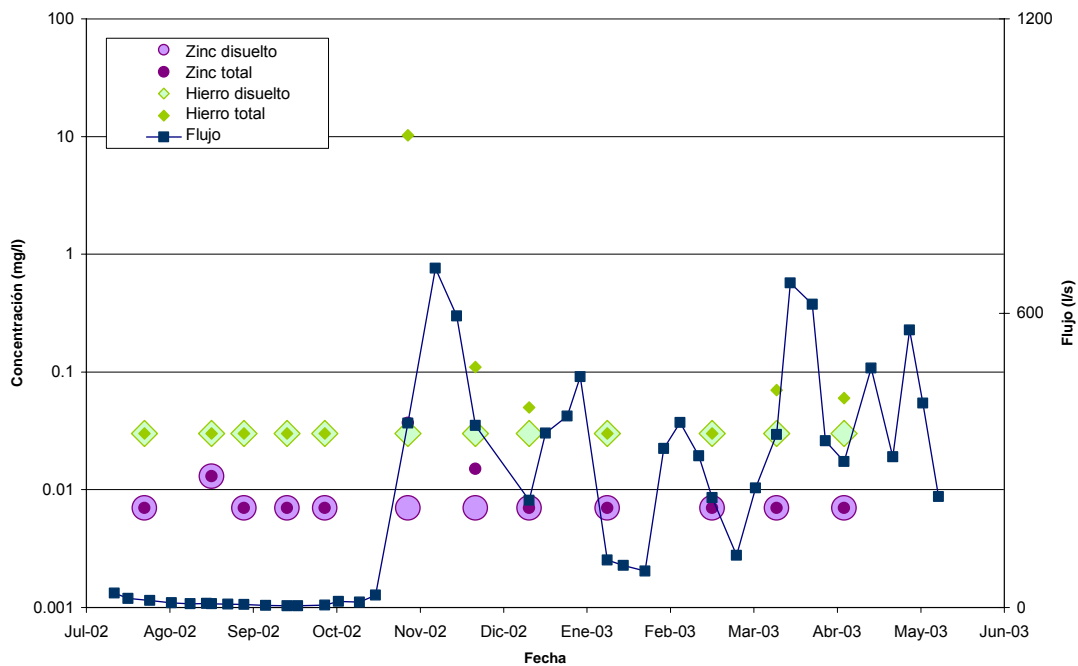
Descripción de Parámetros	Fecha de Muestreo																	
	2002-10-28	2002-11-22	2002-12-20	2002-12-27	2003-12-01	2003-01-16	25/01/2003	2003-01-02	2003-02-21	2003-02-28	2003-08-03	2003-03-21	2003-03-29	2003-11-04	2003-04-26	2003-03-05	2003-10-05	
Bario Total, mg/l						< 0.1												
Berilio Disuelto, mg/l						< 0.002												
Berilio Total, mg/l						< 0.002												
Bismuto Disuelto, mg/l						< 0.1												
Bismuto Total, mg/l						< 0.1												
Boro Total, mg/l						< 0.1												
Cadmio Disuelto (como Cd), mg/l	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003
Cadmio Total (como Cd), mg/l	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003
Cianuro Libre, mg/l	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
Cianuro Wad, mg/l	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
Cianuro Total (como CN), mg/l	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
Cobalto Total, mg/l						< 0.01												
Cobre Disuelto (como Cu), mg/l	< 0.001	0.005	< 0.001			0.004						< 0.001						< 0.001
Cobre Total (como Cu), mg/l	0.092	0.182	0.011			0.011						0.043						0.413
Cromo Disuelto (como Cr), mg/l	< 0.01	< 0.01	< 0.01			< 0.01						< 0.01						< 0.01
Cromo Total (como Cr), mg/l	0.03	0.03	< 0.01			< 0.01						< 0.01						< 0.01
Estatio Disuelto (como Sn), mg/l						< 0.08												< 0.08
Estatio Total (como Sn), mg/l						< 0.08												< 0.08
Hierro Disuelto (como Fe), mg/l	< 0.03	< 0.03	< 0.03			< 0.03						< 0.03						0.04
Hierro Total (como Fe), mg/l	62.19	87.84	8.79			2.45						29.51						306.65
Litio Disuelto (como Li), mg/l						0.03												
Litio Total (como Li), mg/l						0.03												
Manganeso Disuelto (como Mn), mg/l			0.057			0.052						0.019						0.025
Manganeso Total (como Mn), mg/l						0.104						0.011						
Mercurio Total (como Hg), mg/l	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001			< 0.0001						< 0.0001						< 0.0001
Molibdeno Disuelto, mg/l	< 0.02	< 0.02	< 0.02			< 0.02						< 0.02						< 0.02
Molibdeno Total, mg/l	< 0.02	< 0.02	< 0.02			< 0.02						< 0.02						< 0.02
Níquel Disuelto (como Ni), mg/l	< 0.02	< 0.02	< 0.02			< 0.02						< 0.02						< 0.02
Níquel Total (como Ni), mg/l	0.05	< 0.02	< 0.02			< 0.02						< 0.02						< 0.02
Plata Disuelto (como Ag), mg/l	< 0.005	< 0.005	< 0.005			< 0.005						< 0.005						< 0.005
Plata Total (como Ag), mg/l	< 0.005	< 0.005	< 0.005			< 0.005						< 0.005						< 0.005
Plomo Disuelto (como Pb), mg/l	< 0.005	< 0.005	0.013			< 0.005						< 0.005						0.014
Plomo Total (como Pb), mg/l	0.066	0.115	0.033			< 0.005						< 0.005						0.326
Selenio Disuelto (como Se), mg/l						< 0.0001												< 0.0001
Selenio Total (como Se), mg/l	0.00216	0.0036	< 0.0001			< 0.0001						< 0.0001						< 0.0001
Sulfuros (como S <sup>2-</sup> ), mg/l	< 0.03	< 0.03	< 0.03			< 0.03						< 0.03						< 0.03
Zinc Disuelto (como Zn), mg/l	< 0.007	< 0.007	< 0.007			< 0.007						< 0.007						< 0.007
Zinc Total (como Zn), mg/l	0.149	0.22	0.035			0.023						0.088						0.725

# Información de Línea de Base

Calidad de Agua de la Quebrada Laguna Negra STD y STS versus Flujo (SWQN-40)



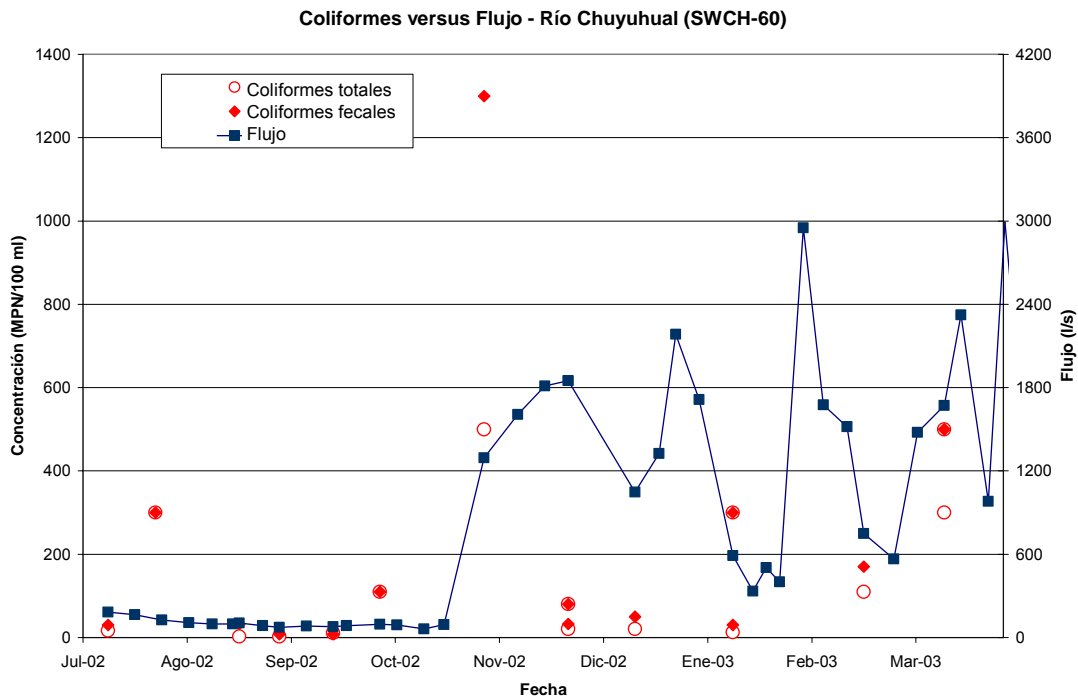
Metales (Disueltos y Totales) - Río Chuyuhual (SWCH-30)



En este gráfico se puede apreciar claramente que la fracción disuelta de zinc y hierro no varían con las estaciones y forman parte de la geoquímica local. Sin embargo, la fracción suspendida aumenta con el flujo (las lluvias); es decir la diferencia entre la fracción total y disuelta proviene de la erosión del suelo.

El efecto de las primeras lluvias es sobre todo visible en el caso de los coliformes, tanto totales como fecales. El siguiente gráfico muestra los valores de coliformes totales y fecales obtenidos durante el año.

# Información de Línea de Base



El pastoreo durante la época de lluvia hace que las heces de los animales se acumulen sobre el área. Las primeras lluvias lavan esta acumulación y la transportan a los cuerpos de agua, con la consecuencia de un incremento significativo en la concentración.

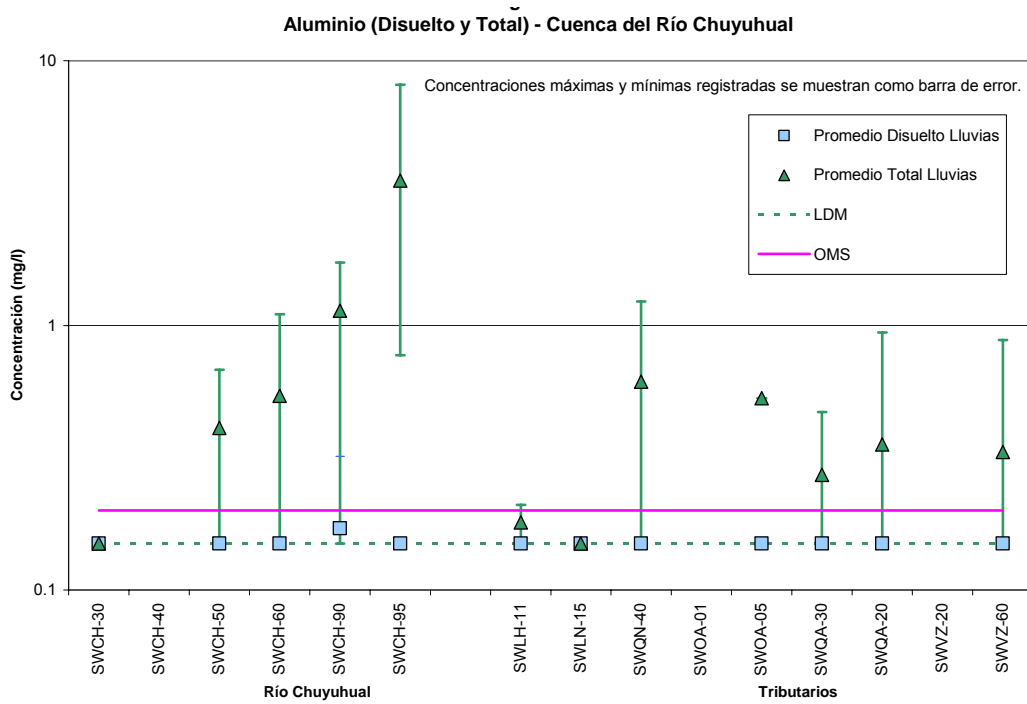
## Gráficos Resumen y por Cuencas

Al igual que las tablas resumen, pueden prepararse gráficos donde se resume la información para cada estación, mostrando ciertos parámetros estadísticos como máximo, mínimo y promedio. El siguiente gráfico muestra un ejemplo de este tipo de gráfico. La ventaja es que se pueden colocar las diferentes estaciones ubicadas a lo largo de la cuenca y observar los cambios en las concentraciones a lo largo de la cuenca. En este caso, los números de las estaciones muestran su posición relativa en la cuenca; valores menores se encuentran en las partes más altas.

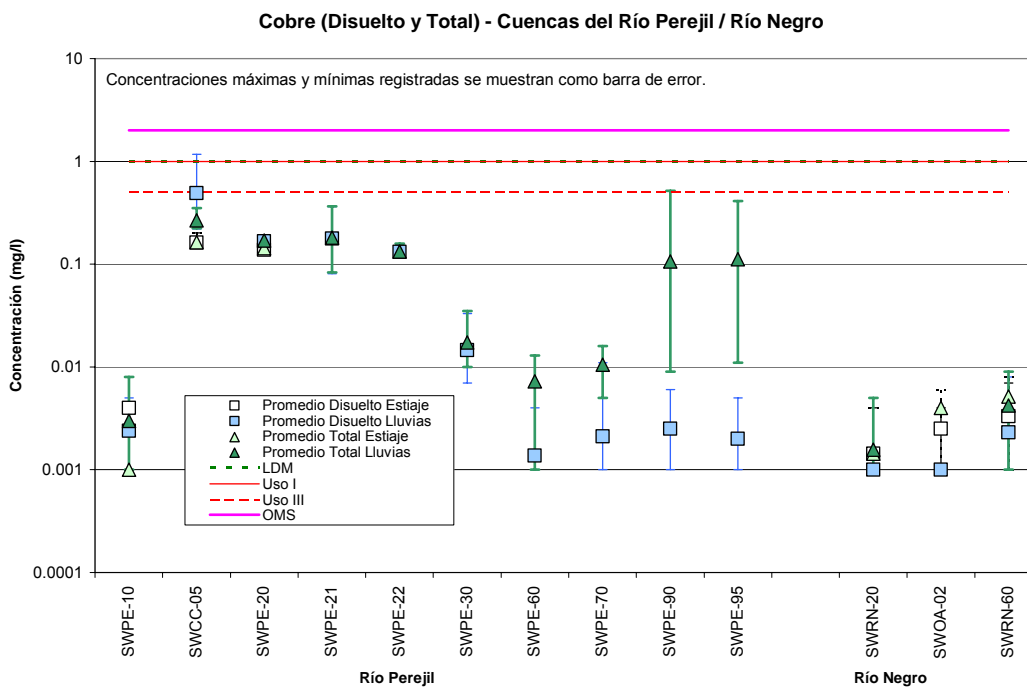
En este ejemplo específico se puede apreciar claramente cómo el aluminio total va aumentando a lo largo de la cuenca; mientras que la fracción disuelta se mantiene constante.

El primer punto SWPE-10 muestra una concentración sin influencia antropogénica y puede considerarse natural. La estación SWCC-05 es una descarga de agua ácida de una mina abandonada que introduce una carga importante de cobre en la cuenca. Debido al bajo pH, el cobre prácticamente se encuentra disuelto, por lo que no existe diferencia entre los valores de cobre disuelto y totales. A lo largo de la cuenca (SWPE-30), el agua del río es diluida por otros afluentes y la concentración de cobre disminuye; el pH aumenta y ya se puede notar una cierta diferencia entre la fracción disuelta y total. Aguas abajo (SWPE-60 y SWCH-70), el pH ha aumentado a tal punto que el cobre ha precipitado y ha alcanzado concentraciones encontradas en aguas a pH neutral; muy parecidas a las concentraciones naturales. La fracción suspendida disminuye por dilución.

# Información de Línea de Base



El siguiente gráfico muestra los resultados para cobre en la cuenca del Río Perejil (PE).



Es de esperar que este fenómeno continúe y que la dilución sea mayor a medida que el río avanza. El salto brusco entre las estaciones SWPE-70 y SWPE-90 es un indicador de fuentes de cobre. En esta zona se encuentran minas artesanales de carbón que generan desmontes cuyos drenajes alcanzan el río.



Estos ejemplos muestran la utilidad de los gráficos en la interpretación de resultados de la línea base. Existen otros tipos de diagramas que se centran más en caracterizar los tipos de agua de acuerdo a sus iones principales.

### **Diagramas de Stiff**

El diagrama de Stiff muestra la relación entre los principales aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y los principales cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ). Se colocan las concentraciones de estos iones en meq/L en tres ejes como se muestra en la Figura 3-6. Este diagrama muestra de manera visual el ión dominante y con esto el tipo de agua; es decir el tipo de anión y catión que predomina.

Los diagramas de Stiff se utilizan para comparar muestras de agua y poder establecer si tienen la misma procedencia u origen; y determinar una semejanza entre muestras. También sirven para evaluar los cambios en el tiempo de la calidad de agua de un determinado punto.

En el ejemplo mostrado se han preparado los diagramas de Stiff para un mismo punto, pero para diferentes monitoreos realizados a lo largo del año. Se aprecia claramente que en octubre el agua tiene al ión sulfato como anión predominante y al magnesio como catión predominante. Este cuadro cambia en abril, cuando el anión predominante es el bicarbonato y el catión predominante es el sodio. La explicación de esto es que durante la época de estiaje, el agua del río proviene de la descarga del agua subterránea y adquiere la composición de la misma, la cual está influenciada por la geología de los estratos en los que se encuentra el agua subterránea. En los meses siguientes, la calidad de agua está influenciada por las escorrentías superficiales producidas por las lluvias. Las escorrentías están influenciadas por la geología superficial, por lo que la composición del agua varía de acuerdo a la estación.

### **3.3.4 Aseguramiento y Control de Calidad de los Resultados del Monitoreo**

Para evaluar la precisión de los resultados del muestreo y del análisis de laboratorio, los programas de monitoreo para la obtención de línea base deben contar con un programa de control y aseguramiento de calidad. Los programas se establecen de acuerdo a las condiciones del sitio, tipo de muestras, etc. Normalmente para agua superficial, se acostumbra enviar duplicados ciegos en un número entre 10 y 15% de las muestras. Los informes de línea base deben presentar el programa de QA/QC que se ha seguido, así como la evaluación de los resultados del programa.

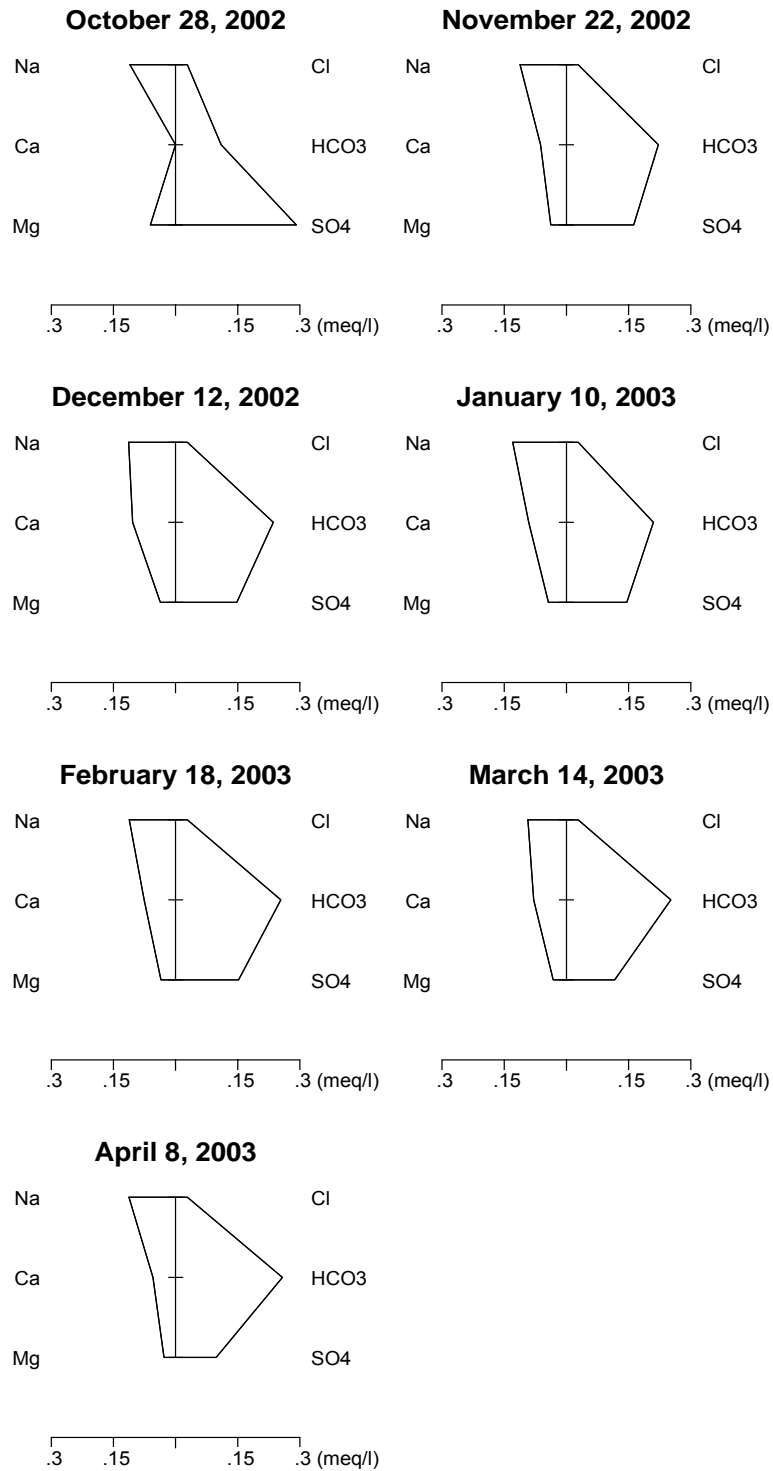
Los cálculos más frecuentemente usados son el balance de carga y la Diferencia Porcentual Relativa (DPR).

### **Balance de Carga**

El cálculo del error en el balance de cargas es una práctica estándar para evaluar la exactitud del análisis de aguas. La electroneutralidad de la solución significa que la suma de cationes en la solución (expresada en meq/L) debe ser igual a la suma de aniones. Para que esto sea posible, se debe contar con análisis completos, que incluyan los iones principales disueltos (típicamente  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ; y ocasionalmente también  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ ). De manera general, un error de hasta 10% en el balance de carga se considera aceptable.

# Información de Línea de Base

**Figura 3-7 Ejemplo de Diagrama de Stiff**



### ***Diferencia Porcentual Relativa (DRP)***

La Diferencia Porcentual Relativa (DRP) es un control de la diferencia entre los valores obtenidos de muestras duplicadas. La DRP se aplica a valores que son por lo menos cinco veces mayores al Límite de Detección del Método (LDM); ya que valores cercanos al LDM pueden variar mucho y se obtienen valores de DRP excesivamente elevados.

La DRP consiste en la comparación porcentual entre la diferencia y la media aritmética de los resultados de las muestras duplicadas y se calcula de la siguiente manera ( $S_1$  y  $S_2$  son la muestra original y la muestra duplicada):

$$PRD (\%) = \frac{|S_1 - S_2|}{\left(\frac{S_1 + S_2}{2}\right)} \times 100$$

Para los análisis de los duplicados enviados al laboratorio, se puede aplicar un límite de control de 20% para la Diferencia Porcentual Relativa (DRP) a los valores de la muestra duplicada y de la muestra original que son igual o mayores que cinco veces el Límite de Detección del Método (LDM). Si la concentración de la muestra duplicada o de la original es menor que cinco veces el (LDM), se aplica un límite de control igual al LDM. Si se supera el límite de control, todos los resultados relacionados se consideran como estimados. Si ambas muestras no son detectables, no se calcula el PRD. Un ejemplo de este procedimiento se muestra en el Anexo B.

Debe tenerse cuidado con los coliformes, los cuales no están distribuidos de manera uniforme en el agua y están sujetos a una variación considerable en el conteo. El cálculo de la DRP no es apropiado para los análisis bacteriológicos. Asimismo, la DRP tampoco se aplica a las mediciones de pH, temperatura y cualquier otro parámetro que no sea aditivo.



## 4. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO

El modelamiento hidrológico consiste en la representación numérica del sistema hídrico de una cuenca con el fin de estimar sus características hidrológicas a partir de la información hidrometeorológica y las propiedades de la cuenca.

Los modelos hidrológicos pueden ser empleados para calcular diversas características hidrológicas (e.g., caudales, áreas de inundación, etc.) así como algunos parámetros meteorológicos (e.g., evaporación), pero no se pueden utilizar para calcular la mayoría de parámetros meteorológicos de entrada, como la temperatura del aire y la precipitación, los que normalmente constituyen los datos de entrada de los modelos.

La ciencia del modelamiento numérico de los sistemas hídricos ha evolucionado de manera vertiginosa en las últimas décadas, en parte gracias al desarrollo de la tecnología informática. Hoy en día existen numerosos modelos numéricos disponibles para una gran variedad de necesidades. Algunos de ellos son de libre disponibilidad y otros son propietarios. La siguiente sección discute brevemente la oferta de modelos hidrológicos disponibles y sus características.

### 4.1 MODELOS HIDROLÓGICOS DISPONIBLES EN EL MERCADO

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar en seis grandes categorías:

- **No Distribuidos:**
  - Los parámetros no varían en el espacio
  - Bajo requerimiento de datos
  - Representación física limitada, empíricos
  - Ejemplos:
    - IHACRES (CEH & ANU),
    - SRM (USDA-ARS),
    - WATBAL (IIASA)
- **Semidistribuidos:**
  - Los parámetros varían parcialmente en el espacio
  - Compromiso entre el requerimiento de datos y la complejidad
  - Ejemplos:
    - HBV-96 (SMHI)
    - HEC-HMS (US-ACE/HEC)
    - HFAM (Hydrocomp)
    - HSPF (US-EPA)
    - PRMS (USGS)
    - SSARR (USGS)
    - SWAT (USDA-ARS)
    - SWMM (US-EPA)
    - TOPMODEL (Lancaster)
- **Distribuidos:**
  - Los parámetros varían en el espacio
  - Enfoque avanzado, alta precisión
  - Alto requerimiento de datos

- Ejemplos:
  - CASC2D (United States Army Research Office US-ARO)
  - CEQUEAU (INRS)
  - GAWSER/GRIFFS (GRCA)
  - HYDROTEL (INRS)
  - MIKE11/SHE (DHI)
  - WATFLOOD (Waterloo)
- **Modelos de Proceso de Evento:**
  - Diseñados para simular eventos específicos
  - Énfasis en infiltración y escorrentía superficial
  - Descargas pico y volumen
- **Modelos de Proceso Continuo:**
  - Diseñados para simulaciones de largo plazo
  - Énfasis en todo el proceso hidrológico
  - Sequías y balance hídrico
- **Modelo de Proceso Continuo/de Evento**

En las Tablas 4-1, 4-2 y 4-3 se muestran algunas características de los modelos citados. No obstante, esta lista no pretende ser exhaustiva y el lector deberá evaluar otras fuentes de información para conocer otros modelos que pueden ser utilizados en los estudios ambientales.

Los modelos citados en las tablas son modelos específicamente diseñadas para el modelamiento hidrológico. Existen además otro tipo de herramientas de carácter más general, como el GoldSim ([www.goldsim.com](http://www.goldsim.com)), que constituyen herramientas de simulación de amplia aplicación, con los cuales se pueden diseñar modelos específicos que se ajusten a las características específicas del caso a estudiar. GoldSim permite el modelamiento mediante simulación probabilística de cualquier sistema y ha sido aplicado con mucho éxito para el modelamiento de balances hídricos de proyectos mineros, entre ellos el depósito de relaves de Antamina.

La selección de un modelo específico por lo general se basa en la preferencia del hidrólogo del proyecto (e.g., el modelo con el cual se encuentra más familiarizado) y en los objetivos del modelamiento (e.g., qué parámetros debe modelar, con qué grado de confianza), así como en la naturaleza, cantidad y calidad de los datos disponibles.

Generalmente, el desarrollo y la aplicación de un modelo hidrológico puede ser un proceso largo y complicado. Sin datos confiables de monitoreo para calibrar y verificar el modelo, no podría existir plena confianza en los resultados de modelamiento.

Los pasos clave en el modelamiento hidrológico son la definición, calibración, verificación y aplicación del modelo.

- La definición del modelo comprende la creación de áreas de cuenca y sus propiedades (suelos, vegetación, tiempos de retardo) y los datos sobre precipitación;
- La calibración del modelo comprende el ajuste de los parámetros del modelo para obtener una buena correspondencia entre los datos simulados y los datos observados;
- La verificación del modelo comprende la verificación del desempeño del modelo en los registros independientes de monitoreo; i.e., los registros que no se emplearon en la calibración; y

# Modelamiento Hidrológico

- La aplicación del modelo comprende el cálculo de los datos de caudal requeridos empleando como datos el modelo calibrado y verificado y la precipitación del diseño.

**Tabla 4-1 Características de Algunos Modelos Hidrológicos no Distribuidos**

Critero	IHACRES	SRM	WATBAL
Escala temporal	Flexible (Min+)	Diario	Diario+
Escala espacial	Flexible	Flexible	Flexible
Procesos modelados:			
Simulación de evento	Sí	No	No
Simulación continua	Sí	Sí	Sí
Acumulación/fusión de nieve	No	Sí	Sí
Intercepción & infiltración	No	No	No
Evapotranspiración	Sí	No	Sí
Ruta de reservorio	No	No	No
Costo	Dominio público	Dominio público	Dominio público
Tiempo de configuración	Corto	Medio	Corto
Experticidad requerida	Baja	Media	Baja
Soporte técnico	Posiblemente del autor	Talleres y panel de consultas	Ninguno
Documentación	Buena	Buena	Buena
Facilidad de uso	Fácil	Media	Fácil
Sistema Operativo	Windows	DOS, Windows	Windows, Excel + Add-in
Ventajas	Fácil de usar. Bajo requerimiento de datos. Simulación de eventos y continua	La última versión permite modelar el efecto del cambio climático en el régimen de escorrentía para el año hidrológico completo.	Fácil de usar. Desarrollado para el estudio de efectos del cambio climático. Algunos parámetros pueden ser optimizados.
Desventajas	No modela fusión de nieve. La evapotranspiración no puede ser computada internamente (puede usar temperatura para estimar los efectos de la evapotranspiración)	Desarrollado para cuencas con escorrentía dominada por fusión de nieve. No simula eventos.	No simula eventos. Parámetros empíricos.
Disponible en	Centre for Ecology and Hydrology <a href="http://www.ceh.ac.uk">http://www.ceh.ac.uk</a>	United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service <a href="http://www.ars.usda.gov">http://www.ars.usda.gov</a>	International Institute for Applied Systems Analysis <a href="http://www.iiasa.ac.at">http://www.iiasa.ac.at</a>
Comentarios	La versión actual es PC-IHACRES	Aplicado en 25 países. La versión actual es WinSRM	Modelo simple de balance de aguas. Código VB disponible.

FUENTE: Cunderlik, Juraj.: Hydrological Model Selection for the CFCAS Project. University of Western Ontario.

# Modelamiento Hidrológico

**Tabla 4-2 Características de Algunos Modelos Hidrológicos Semidistribuidos**

Criterio	HBV-96	HEC-HMS	HFAM
Escala temporal	Diario	Flexible	Diario
Escala espacial	Flexible	Flexible	Flexible
Procesos modelados:			
Simulación de evento	Sí	Sí	Sí
Simulación continua	Sí	Sí	Sí
Acumulación/fusión de nieve	Sí	No	Sí
Intercepción & infiltración	Sí	Sí	Sí
Evapotranspiración	Sí	Sí	Sí
Ruta de reservorio	Sí	No regulado	Sí
Costo	No reportado	Dominio público	US\$ 595
Tiempo de configuración	Medio	Medio	Medio
Experticia requerida	Medio	Medio	Medio
Soporte técnico	Proporcionado por SHMI's International Consulting Services	Servicio bajo suscripción anual	Taller por US\$ 1295
Documentación	No reportado	Buena	No reportado
Facilidad de uso	Media	Media	Media
Sistema Operativo	Windows	Windows	Windows
Ventajas	Modela todos los procesos hidrológicos. Bajo requerimiento de datos	Estado del arte en modelos de dominio público. Datos de ingreso en formato HEC. Compatible con HEC-GEOHMS, HEC-ResSim y otros paquetes del US-ACE. Estructura flexible.	Modela todos los procesos hidrológicos. Herramienta profesional.
Desventajas	Diseñado para pasos diarios. Dinámica de humedad de suelo simplificada. Información disponible limitada.	La evapotranspiración no puede ser computada internamente.	Gran demanda de datos. Información disponible limitada.
Disponible en	Swedish Meteorological and Hydrological Institute. <a href="http://www.smhi.se">http://www.smhi.se</a>	US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center <a href="http://www.hec.usace.army.mil/">http://www.hec.usace.army.mil/</a>	Hydrocomp Inc. <a href="http://www.hydrocomp.com">http://www.hydrocomp.com</a>
Comentarios	Herramienta estándar de predicción en Suecia. Aplicado en más de 40 países.		

FUENTE: Cunderlik, Juraj.: Hydrological Model Selection for the CFCAS Project. University of Western Ontario.



# Modelamiento Hidrológico

**Tabla 4-2 Características de Algunos Modelos Hidrológicos Semidistribuidos (continuación)**

Criterio	HSPF	PRMS	SSARR / SSARRPC
Escala temporal	Diario	Diario	Flexible
Escala espacial	Flexible	Flexible	Flexible
Procesos modelados:			
Simulación de evento	Sí	Sí	Sí
Simulación continua	Sí	Sí	Sí
Acumulación/fusión de nieve	Sí	Sí	Sí
Intercepción & infiltración	Sí	Sí	Sí
Evapotranspiración	Sí	Sí	Sí
Ruta de reservorio	Sí	No reportado	Sí
Costo	Dominio público	Dominio público	Dominio público / US\$ 495
Tiempo de configuración	Largo	Largo	Largo
Experticia requerida	Alta	Alta	Alta
Soporte técnico	No disponible	No disponible	Proporcionado por SAR Consultants previo pago de un derecho.
Documentación	Buena	No disponible	Buena / No disponible
Facilidad de uso	Difícil	Difícil	Difícil
Sistema Operativo	DOS, UNIX	DOS, UNIX	DOS
Ventajas	Modela todos los procesos hidrológicos. Compatibilidad con HEC-DSS. Sistema experto HSPEXP de dominio público para calibración del HPSF.	Capacidades de optimización de parámetros y análisis de sensibilidad.	Modela todos los procesos hidrológicos. / Compatibilidad con HEC-DSS
Desventajas	DOS. Operaciones de entrada/salida. Gran demanda de datos. No hay soporte técnico.	DOS. Operaciones de entrada/salida. No hay soporte técnico. Información disponible limitada.	Operaciones de entrada/salida. Gran demanda de datos. / Versión de 1999 todavía usa programas DOS por lotes. / Información disponible limitada.
Disponible en	US Geological Survey <a href="http://water.usgs.gov">http://water.usgs.gov</a>	US Geological Survey <a href="http://water.usgs.gov">http://water.usgs.gov</a>	SAR Consultants <a href="http://www.pacifier.com/~edonna/">http://www.pacifier.com/~edonna/</a> Columbia Basin Water Management Division <a href="http://137.161.202.92/report/ssarr.htm">http://137.161.202.92/report/ssarr.htm</a>
Comentarios	Evolucionó en HFAM	Se puede solicitar documentación impresa en el USGS. El código fuente en Fortran se encuentra disponible.	El código fuente en Fortran se encuentra disponible

FUENTE: Cunderlik, Juraj.: Hydrological Model Selection for the CFCAS Project. University of Western Ontario.

# Modelamiento Hidrológico

**Tabla 4-2 Características de Algunos Modelos Hidrológicos Semidistribuidos (continuación)**

Criterio	SWAT / AVSWAT	SWMM	TOPMODEL
Escala temporal	Diaria	Horaria	Diaria
Escala espacial	Media	Pequeña	Flexible
Procesos modelados:			
Simulación de evento	No	Sí	Sí
Simulación continua	Sí	Sí	Sí
Acumulación/fusión de nieve	Sí	Sí	Sí
Intercepción & infiltración	Sí	Sí	Sí
Evapotranspiración	Sí	Sí	Sí
Ruta de reservorio	Sí	Sólo no regulado	No disponible
Costo	Dominio público	Dominio público	Dominio público
Tiempo de configuración	Largo	Largo	Largo
Experticidad requerida	Alto	Alto	Medio
Soporte técnico	Lista de los desarrolladores	Disponible por parte de terceros	No disponible
Documentación	Buena	Buena	Buena
Facilidad de uso	Difícil	Difícil	Difícil
Sistema Operativo	DOS / ArcView	DOS, Windows	DOS, Windows
Ventajas	Estructura detallada del modelo.	Modela todos los procesos hidrológicos. Interfaces de usuario proporcionadas por terceros: PCSWMM, Visual-SWMM y MIKE-SWMM	Amplia cobertura en artículos técnicos, boletines y listas de correo. De dominio público.
Desventajas	No modela eventos. Gran demanda de datos. Información disponible limitada.	Orientado a zonas urbanas (pero no exclusivo).	No cuenta con soporte técnico.
Disponible en	Blackland Research and Extension Center - Texas Agricultural Experiment Station <a href="http://www.brc.tamus.edu/swat/">http://www.brc.tamus.edu/swat/</a>	US EPA <a href="http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm">http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm</a>	Lancaster University <a href="http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_top.htm">http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_top.htm</a>
Comentarios	Documentación abundante		Código fuente en Fortran disponible. Numerosas aplicaciones en todo el mundo.

FUENTE: Cunderlik, Juraj.: Hydrological Model Selection for the CFCAS Project. University of Western Ontario.

# Modelamiento Hidrológico

**Tabla 4-3 Características de Algunos Modelos Hidrológicos Distribuidos**

Criterio	CASC2D	CEQUEAU	GAWSER/GRIFFS
Escala temporal	Horaria	Diaria	Diaria
Escala espacial	Flexible	Flexible	Flexible
Procesos modelados:			
Simulación de evento	Sí	Sí	Sí
Simulación continua	Sí	Sí	Sí
Acumulación/fusión de nieve	No	Sí	Sí
Intercepción & infiltración	Sí	Sí	Sí
Evapotranspiración	Sí	Sí	Sí
Ruta de reservorio	No	Sólo no regulado	Sí
Costo	Dominio público WMS - US\$ 2,000 - 4,600	Probablemente gratuito para fines académicos	No disponible
Tiempo de configuración	Largo	Largo	Largo
Experticidad requerida	Alto	Alto	Alto
Soporte técnico	No disponible. Gratuito para usuarios de WMS	Del autor y otros usuarios en el INRS	Posiblemente del autor o GRCA.
Documentación	Buena	Buena	No se conoce
Facilidad de uso	Difícil	Media	No se conoce
Sistema Operativo	DOS, Windows	Windows	No se conoce
Ventajas	Trabaja en conjunto con la interface WMS	Modelo de balance hídrico distribuido. Pronóstico de flujos en tiempo real.	Modela todos los procesos hidrológicos. Desarrollado para una cuenca hidrológicamente similar.
Desventajas	No incluye modelamiento de fusión de nieve y reservorios. Requiere gran cantidad de datos. Sólo para usuarios experimentados. La duración del paso no es flexible.	No apropiado para simular eventos. Estructura de ingreso de datos. Rutas de canal simplificadas.	Probablemente personalizado para las necesidades del GRCA. Información disponible limitada.
Disponible en	United States Army Corps of Engineers <a href="http://www.usace.army.mil">http://www.usace.army.mil</a>	Institute National de la Recherche Scientifique <a href="http://www.ete.inrs.ca/activites/modeles/cequeau/">http://www.ete.inrs.ca/activites/modeles/cequeau/</a>	Grand River Conservation Authority <a href="http://www.grandriver.ca">http://www.grandriver.ca</a>
Comentarios	Requiere permiso del US ACE	Aplicado en más de 60 cuencas en Québec.	Ha dado excelentes resultados en la cuenca del Río Grande (Ontario).

FUENTE: Cunderlik, Juraj.: Hydrological Model Selection for the CFCAS Project. University of Western Ontario.

# Modelamiento Hidrológico

**Tabla 4-3 Características de Algunos Modelos Hidrológicos Distribuidos (continuación)**

Criterio	HYDROTEL	MIKE11/SHE	WATFLOOD
Escala temporal	Flexible	Flexible	Flexible
Escala espacial	Flexible	Flexible	Flexible
Procesos modelados:			
Simulación de evento	Sí	Sí	Sí
Simulación continua	Sí	Sí	Sí
Acumulación/fusión de nieve	Sí	Sí	Sí
Intercepción & infiltración	Sí	Sí	Sí
Evapotranspiración	Sí	Sí	Sí
Ruta de reservorio	Sí	Sí	Sí
Costo	No indicado	US\$ 10,000	US\$ 1,700
Tiempo de configuración	Largo	Largo	Medio
Experticia requerida	Alta	Alta	Alta
Soporte técnico	Posiblemente del autor y otros usuarios en el INRS	Centro de soporte técnico de DHI. Cursos de entrenamiento.	Del autor y otros usuarios en la UW
Documentación	Buena	Buena	Buena
Facilidad de uso	Media	Media	Media
Sistema Operativo	Windows	Windows	Windows
Ventajas	Modela todos los procesos hidrológicos. Se integra con el programa PHYSITEL para el ingreso de datos distribuidos	Modela todos los procesos hidrológicos. Estado del arte. Muy flexible. Diversos módulos add-on disponibles	Modela todos los procesos. Buen soporte técnico. Requerimientos de datos razonables.
Desventajas	Probablemente requiera soporte técnico.	Precio alto. Probablemente requiere soporte técnico. Suscripción anual.	Cerca de convertirse en producto comercial. Interfase de usuario obsoleta. Ruta de canales simplificada.
Disponible en	Institute National de la Recherche Scientifique <a href="http://www.ete.inrs.ca/activites/modeles/hydrotel/fr/accueil.htm">http://www.ete.inrs.ca/activites/modeles/hydrotel/fr/accueil.htm</a>	DHI <a href="http://www.dhigroup.com">http://www.dhigroup.com</a>	University of Waterloo <a href="http://www.civil.uwaterloo.ca/Watflood/">http://www.civil.uwaterloo.ca/Watflood/</a>
Comentarios	Aplicado en muchas provincias de Canadá.	No se sabe si el acuerdo de mantenimiento del software está incluido en la licencia.	Versión ligera WATERFLOOD LITE para estudiantes.

FUENTE: Cunderlik, Juraj.: Hydrological Model Selection for the CFCAS Project. University of Western Ontario.

## 4.2 USO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS EN LOS ESTUDIOS AMBIENTALES DE PROYECTOS MINEROS

El uso de un modelo hidrológico está dirigido por una pregunta que requiere una respuesta o un problema que requiere una solución. Los problemas típicos sobre manejo de aguas que enfrentan los proyectos mineros y los estudios de EIA son los siguientes:

- Se prepara un estudio de línea base de hidrología. No existe información suficiente de monitoreo para clasificar las condiciones de línea base hidrológica. Se desarrolla un modelo hidrológico de cuenca. El modelo debiera clasificar el rango completo de las condiciones de caudal, desde la época seca hasta los flujos de inundación. Generalmente, se desarrolla un modelo continuo, i.e. un modelo que emplea como dato un registro de precipitación a largo plazo.
- Se requiere contar con fuentes de suministro de aguas frescas. Se considera un reservorio de aguas superficiales (en contraposición a un pozo de bombeo de aguas subterráneas). Es necesario dimensionar el reservorio, evaluar su desempeño y proponer el régimen de operaciones. Se desarrolla el modelo hidrológico de la cuenca. Se requiere contar con el área de cuenca, la precipitación, la evaporación, la infiltración y los taludes de la cuenca para el desarrollo del modelo. La escorrentía superficial se calcula como un resultado. Se requiere contar con los registros de caudal para la calibración y validación del modelo (i.e., los caudales calculados se deberán comparar con los caudales medidos).
- Se requiere contar con un sistema de desagüe de la mina. Se desarrolla el modelo hidrogeológico para evaluar el aporte de aguas subterráneas a la mina. Los datos clave para el modelo son las secciones transversales geológicas, las conductividades eléctricas y los niveles de agua. Los aportes de aguas subterráneas constituyen el resultado del modelo. Se requiere contar con el caudal durante la época seca y los niveles de agua para la calibración y validación del modelo.
- Se requiere contar con un depósito de relaves. La presa de relaves se deberá equipar con un aliviadero para el transporte seguro de inundaciones extremas. Se desarrolla el modelo hidrológico para la evaluación del caudal máximo y la dirección de la inundación en el vertedero. Los eventos de precipitación extrema y las propiedades de cuenca constituyen datos para el modelo. Los caudales máximos y los niveles de agua en la cuenca de relaves constituyen los resultados.



## 5. MODELAMIENTO DE CALIDAD DE AGUAS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

El modelamiento de la calidad de las aguas constituye una herramienta muy útil para evaluar los efectos de un vertimiento en un cuerpo de agua natural. Los modelos, generalmente en la forma de modelos matemáticos incorporados en un programa de computador, pueden ser usados para simular el transporte advectivo y dispersivo de los contaminantes procedentes de una descarga y así predecir los cambios que ocurrirían en los cuerpos de agua naturales como consecuencia de dicha descarga. De este modo, el modelamiento permite tomar decisiones de manejo sobre los volúmenes y calidad de la descarga, y las correspondientes medidas que se deberán implementar para alcanzar el objetivo ambiental trazado.

Existen numerosos modelos disponibles en el mercado, los cuales presentan características muy variadas que van desde los muy simples a los más complejos. La complejidad de los modelos es función de cuatro factores:

- *El número y tipo de parámetros indicadores.* Mayor número de parámetros implica mayor complejidad del modelo. Además, algunos parámetros son más difíciles de modelar que otros.
- *El nivel de detalle espacial.* La complejidad del modelo se incrementa con el número de fuentes de contaminación y de estaciones de monitoreo.
- *El nivel de detalle temporal.* Es más sencillo predecir valores promedio de largo plazo que cambios dinámicos de corto plazo. Por otro lado, es más sencillo predecir valores puntuales que distribuciones probabilísticas.
- *La complejidad de los cuerpos de agua.* Pequeñas lagunas donde se puede asumir mezcla completa son más simples de modelar que grandes ríos, los cuales a su vez son más sencillos que grandes lagos o estuarios.

Los modelos generalmente se clasifican de acuerdo a su nivel de complejidad, tipo de cuerpo receptor y parámetros modelados. La Tabla 5-1, tomada del Manual de Prevención y Reducción de la Contaminación publicado por el Grupo del Banco Mundial (WBG 1998) muestra un resumen de los principales criterios de clasificación de los modelos de calidad de aguas.

Como es de suponer, los requerimientos de datos de entrada también se incrementan con la complejidad de los modelos y su alcance de aplicación. Todos los modelos requieren datos de caudales y temperatura. Los modelos estáticos determinísticos requieren estimados puntuales de estos parámetros y generalmente utilizan los caudales de "peor escenario" para estimar el comportamiento de los contaminantes bajo las peores circunstancias. El peor escenario dependerá del tipo de parámetro que se está estudiando. Así, por ejemplo para el caso de metales pesados, el peor escenario se presentará al inicio de la temporada húmeda, cuando los caudales son aún bajos y las primeras lluvias lavan la superficie del suelo arrastrando los contaminantes acumulados durante la época seca. Para otros parámetros como nutrientes o concentración de algas, el peor escenario podría ser el de bajos caudales y altas temperaturas. Generalmente los modelos de calidad de aguas se usan conjuntamente con modelos hidrológicos que proporcionan los datos de caudales y velocidades

# Modelamiento de Calidad de Aguas

requeridos, o bien incorporan sus propias herramientas de modelamiento hidrodinámico para modelar los regímenes transitorios como mareas, mezcla e inundación.

**Tabla 5-1 Criterios de Clasificación de los Modelos de Calidad de Aguas**

Criterio	Comentarios
Descarga individual o enfoque regional	Los modelos más simples pueden ser usados para evaluar los efectos "marginales" de descargas individuales. Para análisis regionales se requieren modelos más complejos.
Estático o dinámico	Resultados estáticos (constantes) o dependientes del tiempo.
Estocástico o determinístico	Los modelos estocásticos presentan los resultados en términos de distribuciones probabilísticas. Los modelos determinísticos producen estimaciones puntuales.
Tipo de cuerpo receptor	Las lagunas y ríos pequeños son generalmente más fáciles de modelar. Lagos grandes, estuarios y grandes sistemas fluviales son más complejos.
Parámetros	
Oxígeno disuelto	Generalmente decrece con el incremento de la descarga. Se utiliza como indicador de la calidad del agua en la mayoría de los modelos.
DBO	Constituye una medida del potencial de consumo de oxígeno de las sustancias contenidas en la descarga. Usada en la mayoría de los modelos.
Temperatura	Generalmente se incrementa con la descarga, particularmente en efluentes de generación eléctrica. Relativamente fácil de modelar.
Nitrógeno amoniacal	Reduce la concentración de oxígeno disuelto y agrega nitratos al agua. Puede ser estimado por la mayoría de los modelos de calidad de aguas.
Concentración de algas	Se incrementa con la contaminación, especialmente cuando se trata de nitratos y fosfatos. Puede ser estimada con modelos moderadamente complejos.
Bacterias coliformes	Indicador de contaminación de origen doméstico o de animales.
Nitratos	Nutriente para las algas y peligroso para la salud a altas concentraciones en el agua de consumo humano. Puede ser estimado por modelos moderadamente complejos.
Fosfatos	Nutriente para las algas. Puede ser estimado por modelos moderadamente complejos.
Compuestos orgánicos tóxicos	Una amplia variedad de compuestos orgánicos (compuestos de carbono) puede afectar la vida acuática y pueden ser directamente dañinos para la salud humana. Generalmente son muy difíciles de modelar.
Metales pesados	Sustancias que contienen plomo, mercurio, cadmio y otros metales pueden causar problemas a la salud humana y a los ecosistemas. Difíciles de modelar en detalle.

FUENTE: WBG 1998



Además de los datos hidráulicos, los modelos requieren de datos de base de los parámetros que se quiere modelar. Esto se requiere tanto para calibrar el modelo a las condiciones reales como para tener un punto de referencia a partir del cual realizar las comparaciones sobre los efectos. Asimismo, los modelos también requieren datos precisos sobre las descargas.

Según se incrementa la complejidad de los modelos, podrían requerirse datos más precisos que reporten las variaciones temporales de caudal, nivel del agua, direcciones de flujo y zonas de inundación; así como mayor precisión en los datos de concentraciones (e.g., máximo, mínimo y promedio diario, etc.).

La selección de un modelo determinado para un caso dado es un asunto que requiere de una adecuada evaluación y juicio profesional. Es por lo tanto muy importante tener en claro los objetivos del estudio y los requerimientos específicos de modelamiento. En determinados casos podría ser suficiente con un modelo simple unidimensional de mezcla completa que calcule los valores promedio de largo plazo de un único parámetro bajo las condiciones del peor escenario y sin considerar las reacciones químicas que sufrirá el contaminante en el medio; mientras que en otro podría requerirse un complejo modelo tridimensional y dinámico que tome en cuenta los efectos transitorios como mareas, tránsito de avenidas, gradientes de temperatura, reacciones químicas de los contaminantes, decaimiento, etc.

Algunos de los criterios que deben tenerse en cuenta al desarrollar o revisar un modelamiento numérico de calidad de aguas son los siguientes:

- Debe tenerse siempre en cuenta que el modelo es una herramienta para facilitar la toma de decisiones y no el fin en sí mismo, por lo que es muy importante definir claramente para qué se necesita el modelo (si es que realmente se necesita) y a qué debe responder. Esto permitirá seleccionar el modelo más apropiado para el objetivo del estudio, incluyendo aspectos como qué parámetros requieren ser modelados, qué simplificaciones son apropiadas y qué nivel de confianza es suficiente.
- La comprensión del sistema físico es un aspecto clave en cualquier estudio. Todo modelo conlleva un cierto grado de simplificación. Sin una adecuada comprensión del sistema físico y su dinámica (e.g., extensión de la cuenca, las derivaciones del caudal, balance hídrico, hidrogeología, etc.) no se puede saber qué simplificaciones son apropiadas sin sacrificar la confiabilidad del resultado. La complejidad del modelo matemático o los recursos que ofrece el programa de computadora (e.g., presentación de resultados en forma gráfica, etc.) no sustituyen una buena comprensión del sistema físico y el criterio profesional para la selección del modelo, su aplicación y la interpretación de sus resultados.
- Cualquier modelo es únicamente tan bueno como los supuestos y los datos básicos que lo conforman. Dedicar un esfuerzo desproporcionado al desarrollo de un modelo sin contar con datos suficientes sobre la precipitación, el caudal o el nivel de aguas es contraproducente. Algunos modelos requieren de grandes cantidades de información muy precisa, por lo que la selección del modelo tiene que tener en cuenta la información disponible.

En la siguiente sección se discuten los fundamentos teóricos que sustentan a la mayoría de los modelos de calidad de aguas.

## 5.2 TRANSPORTE Y DESTINO DE LOS CONTAMINANTES EN LOS CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES NATURALES

Estimar el transporte y destino de los contaminantes en la naturaleza constituye una tarea interesante y un reto. El ambiente rara vez puede ser aproximado como un medio bien mezclado y las sustancias químicas en él están generalmente lejos del equilibrio. En tal sentido, la comprensión de los mecanismos que gobiernan el transporte y destino de los contaminantes en la naturaleza requiere de un buen conocimiento de los aspectos de la mecánica de fluidos, termodinámica química, cinética química y los procesos biológicos que interactúan con las sustancias químicas. Es necesario estudiar a las sustancias según ellas se mueven, difunden y dispersan en el ambiente. Estas sustancias químicas inevitablemente reaccionarán con otras para formar nuevos compuestos, en procesos que se aproximan al equilibrio pero nunca lo alcanzan. Muchas veces estas reacciones serán biológicamente catalizadas con tasas de reacción que responden más a las del metabolismo de los organismos que a las tasas de primer o segundo orden de la cinética química.

Una discusión detallada de los fundamentos y procesos que gobiernan el transporte y destino de los contaminantes en los cuerpos de agua naturales excede los alcances de esta Guía pero se encuentra bien documentada en muchos textos tales como los de Gulliver (2007), Zheng y Bennet (2002), Martin y McCutcheon (1999), McCutcheon y French (1993), Lung (1993) y Henderson-Sellers (1991). En las secciones siguientes se presenta un resumen de los conceptos básicos que gobiernan estos fenómenos.

### 5.2.1 Fundamentos Teóricos

Existen dos mecanismos principales que gobiernan el transporte de una sustancia química en un medio acuoso: el transporte advectivo o convectivo y el transporte dispersivo o dispersión.

El transporte advectivo o convectivo es aquel que ocurre por el movimiento del fluido. La sustancia se transporta conjuntamente con la masa del fluido.

El transporte dispersivo o dispersión representa el transporte de la sustancia debido tanto al gradiente de concentraciones (difusión) como a la turbulencia del fluido (difusión turbulenta).

En el caso más simple de modelamiento de calidad de aguas, se asume la mezcla completa de la sustancia en condiciones estáticas, se desprecia el efecto de la difusión y se asume que la sustancia es conservativa, i.e., se desprecian los mecanismos de degradación que pudieran afectar la concentración de la sustancia.

Este modelo, si bien simple y fácil de aplicar, rara vez responde a todos los interrogantes que llevan a la construcción de un modelo. Este modelo puede estar representado por la ecuación de balance de masa bajo mezcla completa:

$$C_2 = \frac{C_1 Q_1 + cq}{Q_1 + q} \quad (5-1)$$

donde:

- $q$  y  $c$  son el caudal y la concentración del parámetro de interés en la descarga;
- $Q_1$  y  $C_1$  son el caudal y la concentración del parámetro antes de la descarga; y
- $C_2$  es la concentración del parámetro después de la descarga (i.e., después de la zona de mezcla).

Son muy limitados los casos en los que un modelo como éste es suficiente. En todos los otros casos, es necesario estudiar los mecanismos de transporte advectivo y dispersivo, así como los procesos de decaimiento y crecimiento que afectan la concentración del parámetro de interés.

Existen dos métodos generales para describir el comportamiento de un fluido: el método Euleriano y el método Lagrangiano. En el método Euleriano se observan las propiedades del fluido (e.g., velocidad, concentración de la sustancia  $x$ , etc.) en posiciones fijas en el espacio, para lo cual se define el volumen de control, el cual se encuentra inamovible respecto a un sistema de coordenadas fijo. En cambio en el método Lagrangiano el observador sigue el movimiento de las partículas del fluido, independientemente de su posición en el espacio. Para ello se define la masa de control como la unidad de referencia, la cual se desplaza siguiendo el movimiento de la masa de fluido. Es posible convertir un método al otro mediante la aplicación del Teorema de Transporte de Reynolds (ver Anexo C).

De acuerdo con el Teorema del Transporte de Reynolds, el transporte de un contaminante en un medio acuoso está dado por la Ecuación 5-2:

$$\frac{Dc}{Dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla c \bullet \bar{v} = \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} \quad (5-2)$$

donde:

- $c$  = Concentración del contaminante
- $\nabla c$  = Gradiente de la concentración del contaminante
 
$$\nabla c = \left( \frac{\partial c}{\partial x}, \frac{\partial c}{\partial y}, \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$
- $\bar{v}$  = Velocidad del fluido
 
$$\bar{v} = (u, v, w)$$

El primer miembro de la Ecuación 5-2 constituye la derivada material y representa el método lagrangiano, mientras que el segundo miembro representa el equivalente euleriano. El primer término del segundo miembro representa la variación en el tiempo de la concentración al interior del volumen de control y el segundo miembro representa el transporte de la sustancia a través de la superficie que limita el volumen de control.

La concentración  $c$  comprende a su vez la fracción disuelta  $c_d$  y la fracción asociada a los sólidos (por sorción)  $c_{sp}$ , expresada como masa de soluto por unidad de masa de sólidos suspendidos en el agua. Sea  $m_s$  la masa de sólidos suspendidos por unidad de volumen de agua y  $\eta$  la porosidad o fracción del volumen ocupado por el agua. Entonces  $c = \eta c_d + c_{sp} \eta m_s$ .

Por su parte,  $c_{sp} = K_{sp}c_d$ , donde  $K_{sp}$  es el coeficiente de partición del soluto entre el agua y los sólidos, el cual a su vez está relacionado con el contenido de carbono de los sólidos mediante la relación  $K_{sp} = f_{cp}K_{sc}$ , donde  $f_{cp}$  es la fracción de masa de carbono en las partículas y  $K_{sc}$  es el coeficiente de partición del soluto entre el agua y el carbono (debido a que la sorción está controlada principalmente por el contenido de carbono de las partículas). Así,

$$c = \eta c_d (1 + f_{cp} K_{sc} m_s) \quad (5-3)$$

Reemplazando (5-3) en (5-2) y simplificando, se obtiene:

$$\frac{D(\eta c_d)}{Dt} (1 + f_{cp} K_{sc} m_s) = \frac{\partial(\eta c_d)}{\partial t} (1 + f_{cp} K_{sc} m_s) + \eta \left( u \frac{\partial c_d}{\partial x} + v \frac{\partial c_d}{\partial y} + w \frac{\partial c_d}{\partial z} \right) \quad (5-4)$$

La ecuación 5-4 permite predecir cualquier contaminante disuelto en el agua. De manera similar, se puede derivar una expresión equivalente en términos de la concentración del contaminante en los sólidos:

$$\frac{D(\eta c_{sp})}{Dt} \left( \frac{1}{f_{cp} K_{sc}} + m_s \right) = \frac{\partial(\eta c_{sp})}{\partial t} \left( \frac{1}{f_{cp} K_{sc}} + m_s \right) + \frac{\eta}{f_{cp} K_{sc}} \left( u \frac{\partial c_{sp}}{\partial x} + v \frac{\partial c_{sp}}{\partial y} + w \frac{\partial c_{sp}}{\partial z} \right) \quad (5-5)$$

Para resolver la ecuación 5-4 (ó 5-5) es necesario calcular la derivada material del primer miembro. Esta derivada proviene del método lagrangiano, es decir que está definida para la masa de control. En el método lagrangiano la masa de control (en este caso el agua) es invariable, pero las propiedades del fluido sí pueden variar. En particular, la variación de la concentración de un contaminante sólo podrá ocurrir por dispersión, o bien por decaimiento o crecimiento del parámetro dentro de la masa de control.

Esto da lugar a tres escenarios posibles:

- *La sustancia no decae.* En este caso el gradiente de concentración está dirigido hacia afuera de la masa de control (i.e., positivo) y la concentración disminuye por dispersión. Este caso se denomina sustancia conservativa. Ejemplos de sustancias conservativas son las sales inorgánicas.
- *La sustancia decae.* Esto ocurre cuando existe algún mecanismo que extrae sustancia de la masa de control. En este caso, la desaparición de la sustancia al interior de la masa de control deja un vacío que es llenado desde el exterior. El gradiente de concentración está dirigido hacia el interior de la masa de control (i.e., negativo) y se denomina sustancia no conservativa. El decaimiento puede ocurrir por hidrólisis, fotólisis, degradación microbiana, sedimentación o volatilización. Cada una de ellas tiene sus propios mecanismos que es necesario conocer. Ejemplos de sustancias no conservativas son el DBO y los metales pesados. El decaimiento está representado por el coeficiente de decaimiento acumulado  $k$ , que toma en cuenta todos los diferentes mecanismos de decaimiento.
- *La sustancia crece dentro de la masa de control.* Esto ocurre únicamente por crecimiento microbiano. En este caso el gradiente de concentración está dirigido hacia afuera (i.e., positivo) y la sustancia se denomina sustancia de crecimiento. Un ejemplo de este tipo es la concentración de algas. El crecimiento está representado por el coeficiente de crecimiento  $\mu$ .

Además, durante el desplazamiento de la masa de control es posible que a su paso se encuentre con más sustancia presente en el medio, lo que creará un gradiente adicional hacia el interior de la masa de control (i.e., negativo). Este mecanismo de ingreso directo está representado por el parámetro  $G$ .

Entonces, sea  $\vec{j}$  el vector de dispersión y  $\vec{n}$  el vector normal a la masa de control. Luego, la derivada material de la concentración estará dada por la Ecuación 5-6:

$$\int_M \frac{D(\eta c_d)}{Dt} dV = \begin{cases} \oint_A (+\vec{j} \cdot \vec{n}) dA & \text{(Sustancia conservativa)} \\ \oint_A (-\vec{j} \cdot \vec{n}) dA + \int_M -k\eta c_d dV + \int_M G dV & \text{(Sustancia no conservativa)} \\ \oint_A (+\vec{j} \cdot \vec{n}) dA + \int_M \mu\eta c_d dV & \text{(Sustancia de crecimiento)} \end{cases} \quad (5-6)$$

Aplicando el teorema de Gauss-Green (ver Glosario) para las integrales de superficie y cancelando las integrales de volumen en el límite, se obtiene la forma diferencial de la Ecuación 5-6. Si además se define  $\vec{j} = E \cdot [-\nabla(\eta c_d)]$ , donde  $E$  es el tensor de dispersión, se obtiene la siguiente ecuación que representa la forma diferencial de la derivada material de la concentración:

$$\frac{D(\eta c_d)}{Dt} = \begin{cases} \nabla \cdot \{E \cdot [-\nabla(\eta c_d)]\} & \text{(Sustancia conservativa)} \\ -\nabla \cdot \{E \cdot [-\nabla(\eta c_d)]\} - k\eta c_d + G & \text{(Sustancia no conservativa)} \\ \nabla \cdot \{E \cdot [-\nabla(\eta c_d)]\} + \mu\eta c_d & \text{(Sustancia de crecimiento)} \end{cases} \quad (5-7)$$

Al desarrollar esta expresión debe tenerse en cuenta que la dispersión es un fenómeno que ocurre perpendicular a un área. Por lo tanto, todos los componentes de índices mixtos del tensor  $E$ , tales como  $E_{xy}$ ,  $E_{yx}$  y  $E_{xz}$  representan dispersión paralela a un área y no normal a ella, por lo que son nulos. Por lo tanto, la Ecuación 5-7 para el caso conservativo se convierte en la siguiente, luego de desarrollar y simplificar:

$$\frac{D(\eta c_d)}{Dt} = - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( E_{xx} \frac{\partial \eta c_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_{yy} \frac{\partial \eta c_d}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_{zz} \frac{\partial \eta c_d}{\partial z} \right) \right] \quad (5-8)$$

Dado que en la columna de agua el volumen de los sólidos es muy pequeño,  $\eta \approx 1$ . Reemplazando este valor, combinando las ecuaciones 5-8 y 5-4 y simplificando, se obtienen las ecuaciones generales que controlan el transporte advectivo y dispersivo de contaminante en medios acuosos:

*Caso conservativo:* (5-9a)

$$\frac{\partial c_d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( E_{xx} \frac{\partial c_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_{yy} \frac{\partial c_d}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_{zz} \frac{\partial c_d}{\partial z} \right) + \frac{1}{1 + f_{cp} K_{sc} m_s} \left( u \frac{\partial c_d}{\partial x} + v \frac{\partial c_d}{\partial y} + w \frac{\partial c_d}{\partial z} \right) = 0$$

Caso no conservativo:

(5-9b)

$$\frac{\partial c_d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( E_{xx} \frac{\partial c_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_{yy} \frac{\partial c_d}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_{zz} \frac{\partial c_d}{\partial z} \right) + \frac{1}{1 + f_{cp} K_{sc} m_s} \left( u \frac{\partial c_d}{\partial x} + v \frac{\partial c_d}{\partial y} + w \frac{\partial c_d}{\partial z} \right) + k c_d - G = 0$$

Caso de crecimiento:

(5-9c)

$$\frac{\partial c_d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( E_{xx} \frac{\partial c_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_{yy} \frac{\partial c_d}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_{zz} \frac{\partial c_d}{\partial z} \right) + \frac{1}{1 + f_{cp} K_{sc} m_s} \left( u \frac{\partial c_d}{\partial x} + v \frac{\partial c_d}{\partial y} + w \frac{\partial c_d}{\partial z} \right) - \mu c_d = 0$$

Estas ecuaciones se resuelven mediante métodos numéricos, pero antes es necesario obtener valores para  $E_{xx}$ ,  $E_{yy}$ ,  $E_{zz}$ ,  $f_{cp}$ ,  $K_{sc}$ ,  $k$ ,  $\mu$  y  $G$ .

### Términos de Transporte

Los términos que contienen  $\partial c_d / \partial x$ ,  $\partial c_d / \partial y$  y  $\partial c_d / \partial z$  son llamados términos de transporte. Los términos que contienen las  $E_{xx}$ ,  $E_{yy}$  y  $E_{zz}$  representan el transporte dispersivo y los términos que contienen la velocidad representan el transporte advectivo.

Los valores de los coeficientes de dispersión pueden ser obtenidos de la literatura para condiciones específicas o pueden ser medidos en el campo utilizando un trazador y midiendo las concentraciones del trazador a una distancia dada. Esta labor resulta más sencilla si el caso puede reducirse a una sola dimensión (e.g., un canal o río pequeño). En ese caso, aplicando el método lagrangiano, la ecuación 5-9a se reduce a

$$\frac{\partial c_d}{\partial t} = -E_{xx} \frac{\partial^2 c_d}{\partial x^2}$$

y considerando que el método lagrangiano sigue a la masa de control en su movimiento,  $dt = dx/u$ , con lo cual la ecuación anterior se convierte en

$$E_{xx} \frac{d^2 c_d}{dx^2} + u \frac{dc_d}{dx} = 0 \quad \text{cuya solución es} \quad c_d = c_{d0} e^{-\left(\frac{u}{E_{xx}}\right)x} \quad (5-10)$$

Debido a la dispersión, la masa del trazador no llegará al mismo tiempo al punto de control, sino que una parte llegará antes y otra llegará después. La diferencia de tiempo entre el primer y el último arribo es una medida de la dispersión. La concentración promedio se puede calcular mediante el promedio de sucesivas medidas ponderado por el intervalo de tiempo. Luego, despejando  $E_{xx}$  de (5-8) es posible obtener un estimado para dicho parámetro.

En casos más complejos se requiere conocer las componentes de la velocidad y se resuelve el caso 3-D para los tres coeficientes de dispersión.

### Término de Transformación Cinética, $k c_d$

Las transformaciones cinéticas que puede sufrir un contaminante son hidrólisis, fotólisis, degradación o crecimiento microbiano, sedimentación y volatilización. Salvo la última, todas las otras formas de transformación cinética pueden ser representadas

mediante un proceso de primer orden, por lo que el coeficiente  $k$  puede ser expresado como

$$k = k_h + k_p + k_m + k_s$$

donde  $k_h$ ,  $k_p$ ,  $k_m$  y  $k_s$  corresponden a los coeficientes cinéticos de hidrólisis, fotólisis, degradación microbiana y sedimentación respectivamente.

La hidrólisis es la reacción de la sustancia con el agua y generalmente forma precipitados que extraen la sustancia de la masa de control. La hidrólisis puede ocurrir en medio neutro o puede ser catalizada en medio ácido o básico.

La fotólisis consiste en la modificación de un compuesto por efectos de la radiación electromagnética. Cuando un fotón de energía es absorbido por una molécula, ésta se vuelve inestable y puede sufrir reacciones químicas (a saber, fotooxidación, fotoreducción, fotoisomerización, fotosustitución, fotoadición, fotofragmentación y fotohidrólisis) o reemitir la energía bajo diferentes mecanismos (e.g., fluorescencia).

Los procesos de degradación microbiana, crecimiento microbiano y muerte microbiana son denominados cinética microbiana. Estos procesos están controlados por la disponibilidad de alimento para las bacterias. Los modelos generalmente se basan en el supuesto de que el contaminante en estudio constituye el factor limitante para el crecimiento de las bacterias.

La sedimentación se aplica únicamente a los sólidos suspendidos en el agua y es representada por un proceso de primer orden.

La volatilización es el transporte de la sustancia hacia la atmósfera. Este proceso está controlado por el equilibrio entre la fase disuelta y la fase gaseosa de la sustancia, según la ley de Henry. El punto de equilibrio es específico para cada sustancia y está determinado por el valor de la constante de Henry correspondiente.

Adicionalmente, algunos modelos pueden incorporar otros mecanismos específicos para determinados parámetros, como reacciones de oxidación-reducción, formación de quelatos y complejos, metilación, etc.; para lo cual incorporan modelos matemáticos específicos.

## 5.2.2 Soluciones Numéricas

Para resolver las ecuaciones (5-9) existen diferentes enfoques. Las soluciones analíticas son pocas veces prácticas y se aplican generalmente cuando se pueden asumir ciertas limitaciones, tales como transporte unidimensional, dispersión despreciable, etc. Un ejemplo clásico de este tipo de soluciones es la propuesta por Streeter y Phelps (1925) para el modelamiento del DBO y oxígeno disuelto en el río Ohio, que constituye la primera experiencia de modelamiento de DBO y oxígeno disuelto en cuerpo de agua natural:

En los casos más complejos, se prefieren soluciones numéricas tales como de Elementos Finitos.

El método de elementos finitos es un método de aproximación discreta a problemas continuos, de tal forma que:

# Modelamiento de Calidad de Aguas

- El continuo es dividido en un número finito de partes o "elementos", cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados "nodos". Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con los elementos adyacentes.
- La solución del sistema complejo sigue entonces las reglas de los problemas discretos y el sistema completo queda definido por el ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas "funciones de interpolación" o "funciones de forma".

El método de elementos finitos permite tratar los problemas de ecuaciones diferenciales parciales como los de la Ecuación (5-9) mediante la definición de una malla apropiada de segmentos y nodos.

Este enfoque constituye la base de muchos programas de computador disponibles para el modelamiento de la calidad de aguas, según se describe en la sección siguiente.

## 5.3 MODELOS DE CALIDAD DE AGUAS DISPONIBLES EN EL MERCADO

La variedad de modelos de calidad de aguas disponibles en el mercado es muy amplia. Algunos son de libre disponibilidad y otros son propietarios. Algunos son de propósito general y otros son muy específicos para modelar un problema específico como el comportamiento de la pluma de la descarga o una sustancia específica como pesticidas o DBO.

Una buena fuente de información para el lector interesado la constituye el Centro para el Modelamiento de la Evaluación de la Exposición (Center for Exposure Assessment Modeling - CEAM) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) (<http://www.epa.gov/ceampubl/index.htm>). El CEAM proporciona técnicas y herramientas para ayudar en la evaluación de la exposición a contaminantes en ambientes acuáticos, terrestres y rutas multimedia para compuestos orgánicos y metales. El CEAM distribuye modelos de simulación ambiental y bases de datos para fuentes no puntuales urbanas y rurales, contaminación de cursos de agua, lagunas y estuarios por sustancias tóxicas y no tóxicas, hidrodinámica de mareas, equilibrio geoquímico y bioacumulación en las cadenas tróficas. Además de distribuir software, el CEAM también revisa y evalúa los programas de software existentes y propuestos y proporciona soporte técnico a los usuarios.

Asimismo, el Centro de Soporte Técnico para el Modelamiento de Cuencas y Calidad de Aguas de la USEPA (Watershed & Water Quality Modeling Technical Support Center - [www.epa.gov/athens/wwqtsc](http://www.epa.gov/athens/wwqtsc)), proporciona acceso a una diversidad de herramientas y modelos para ayudar en la determinación de los niveles de carga máxima diaria (Total Maximum Daily Loads - TMDL) requeridos por la regulación ambiental americana, así como en la selección de sitio para vertimiento de efluentes y planes de protección de cuencas. El Centro proporciona gratuitamente diversos modelos y herramientas, así como información y talleres de capacitación.



**Tabla 5-2 Resumen de los principales modelos de calidad de aguas aplicables a estudios mineros**

Modelo	Descripción	Distribuido por
HSCIM2D	Modelo de elementos finitos para simular el flujo bidimensional verticalmente integrado de aguas superficiales (típicamente la hidrodinámica de estuarios), el transporte de sedimentos y el transporte de contaminantes. El programa consta de dos módulos: el HYDRO2D realiza el modelamiento hidrodinámico y el CS2D realiza el modelamiento del transporte de contaminantes y sedimentos.	USEPA-CEAM <a href="http://www.epa.gov/ceampub/swater/index.htm">http://www.epa.gov/ceampub/swater/index.htm</a>
QUAL2K	Modelo unidimensional de calidad de aguas para ríos y quebradas. Permite modelar nitrógeno, fósforo, oxígeno disuelto, DBO, demanda de oxígeno del sedimento, algas, pH, perifiton y patógenos.	USEPA - Watershed & Water Quality Modeling Technical Support Center. <a href="http://www.epa.gov/athens/wqatsc/">http://www.epa.gov/athens/wqatsc/</a>
RUSLE2	Desarrollado para modelar la erosión del suelo por efecto de la lluvia y el flujo superficial asociado.	USDA Agricultural Research Service
SERAFM	Modelo estacionario de proceso del ciclo del mercurio, diseñado específicamente para ayudar a los evaluadores de riesgo en la estimación de concentraciones de mercurio en la columna de agua, el sedimento y el tejido de los peces para un cuerpo de agua específico. Puede predecir las especies de HgO.	USEPA-CEAM <a href="http://www.epa.gov/ceampub/swater/index.htm">http://www.epa.gov/ceampub/swater/index.htm</a>
Visual Plumes	Modelo para la simulación de chorros y plumas de descargas en cuerpos de agua superficiales. También ayuda en la preparación de análisis de zonas de mezcla, cargas máximas diarias totales y otras aplicaciones de calidad de aguas.	USEPA-CEAM <a href="http://www.epa.gov/ceampub/swater/index.htm">http://www.epa.gov/ceampub/swater/index.htm</a>
WASP	Modelo dinámico de compartimentos para sistemas acuáticos, incluyendo la columna de agua y el bentos. Permite modelar en 1, 2 y 3 dimensiones y para una gran variedad de sustancias, incluyendo nitrógeno, fósforo, oxígeno disuelto, DBO, demanda de oxígeno del sedimento, algas, perifiton, patógenos, compuestos orgánicos, metales, mercurio y temperatura. El modelo es capaz de representar el transporte advectivo y difusivo de descargas puntuales y difusas y los intercambios de borde. WASP puede acoplarse a modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos que proporcionen datos de caudales, velocidades.	USEPA - Watershed & Water Quality Modeling Technical Support Center. <a href="http://www.epa.gov/athens/wqatsc/">http://www.epa.gov/athens/wqatsc/</a>
WHATIF	Es un programa que combina diversas herramientas y modelos para evaluar la salud de las cuencas y cursos de agua, con especial énfasis en las comunidades de peces. El programa comprende herramientas para el modelamiento hidrológico, herramientas de cálculo de hábitats de peces, de diversidad de macroinvertebrados y un modelo de proceso para predecir la dinámica de la biomasa del curso de agua.	USEPA-CEAM <a href="http://www.epa.gov/ceampub/swater/index.htm">http://www.epa.gov/ceampub/swater/index.htm</a>
AQUATOX	Modelo de simulación para sistemas acuáticos diseñado para predecir el destino de diversos contaminantes, tales como nutrientes y compuestos orgánicos, y sus efectos en el ecosistema, incluyendo peces, invertebrados y plantas acuáticas. A diferencia de la mayoría de modelos de calidad de aguas, AQUATOX es un modelo de ecosistema. No solo incluye numerosos tipos de plantas, invertebrados y peces, sino que trata a la biota en su interacción con los sistemas físicos/químicos.	USEPA <a href="http://www.epa.gov/waterscience/models/aquatox/">http://www.epa.gov/waterscience/models/aquatox/</a>
CORMIX	Modelo hidrodinámico de zona de mezcla diseñado para evaluar el impacto en la zona de mezcla provocado por descargas puntuales. El sistema enfatiza el rol de las interacciones de frontera para predecir la geometría de la pluma y la dilución. CORMIX es un sistema experto.	MixZone Inc. <a href="http://www.mixzon.com/">http://www.mixzon.com/</a>
EDP-RIV1	Modelo hidrodinámico unidimensional para cursos de agua. Consta de dos módulos: el módulo hidrodinámico y el módulo de calidad. El primero arroja resultados sobre la dinámica del flujo que son requeridos por el segundo. EDP-RIV1 puede modelar la interacción de 16 variables, incluyendo temperatura, especies de nitrógeno (o DBO de nitrógeno) especies de fósforo, oxígeno disuelto, demanda de oxígeno carbonosa (2 especies), algas, hierro, manganeso, bacterias coliformes y dos parámetros arbitrarios. Asimismo, el modelo puede simular el impacto de las macrofitas en el oxígeno disuelto y en el	USEPA - Watershed & Water Quality Modeling Technical Support Center. <a href="http://www.epa.gov/athens/wqatsc/">http://www.epa.gov/athens/wqatsc/</a>
FESWMS.2VH	Modelo para la simulación bidimensional de los cursos de aguas superficiales.	US Geological Service <a href="http://water.usgs.gov/software/surface_water.html">http://water.usgs.gov/software/surface_water.html</a>
PHREEQC	Modelo para el cálculo de la especiación, reacción batch, transporte unidimensional y cálculos geoquímicos inversos en cuerpos de aguas superficiales.	US Geological Service <a href="http://water.usgs.gov/software/surface_water.html">http://water.usgs.gov/software/surface_water.html</a>
MINTEQA2	Modelo de equilibrio de especiación para calcular la composición de equilibrio de soluciones acuosas acuosas diluidas en el laboratorio o en sistemas acuosos naturales. El modelo es útil para calcular la distribución de masa en el equilibrio entre especies disueltas, adsorbidas y fases sólidas múltiples bajo diversas condiciones, incluyendo una fase gaseosa con presión parcial constante. El modelo incluye una extensa base de datos de constantes de equilibrio que permite resolver una gran variedad de problemas sin requerir información adicional del usuario. Asimismo, el modelo emplea un conjunto de componentes predefinidos que incluye iones libres tales como Na <sup>+</sup> y complejos neutros y cargados (e.g., H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> , Cr(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> ). La base de datos de reacciones está escrita en términos de estos componentes como reactivos. Un programa auxiliar, PRODEF2A, sirve como preprocesador interactivo para generar los archivos de entrada que	USEPA-CEAM <a href="http://www.epa.gov/ceampub/mmedia/index.htm">http://www.epa.gov/ceampub/mmedia/index.htm</a>

La Tabla 5-2 muestra algunos de los programas de modelamiento de calidad de aguas superficiales que podrían ser aplicables para estudios mineros. Cada uno de ellos ha sido desarrollado para aplicaciones específicas, por lo que la selección de un modelo debe ser realizada de manera cuidadosa, atendiendo al tipo de problema que se desea resolver. La selección del modelo apropiado requerirá entonces un conocimiento apropiado del medio que se desea modelar, los supuestos y limitaciones de cada modelo y la información disponible para alimentar el modelo. En un estudio ambiental en el que se aplique alguna forma de modelamiento de calidad de aguas, el proponente deberá ser capaz de justificar adecuadamente la selección del modelo en términos de la idoneidad del fundamento teórico del modelo para el caso dado y la aplicabilidad de los supuestos del modelo, así como los márgenes de error de los resultados del modelo.

## 6. EVALUACIÓN DE IMPACTOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES

### 6.1 IMPACTOS HIDROLÓGICOS

Los impactos hidrológicos se manifiestan típicamente en los cambios de caudal o las en condiciones del nivel de aguas. Generalmente se consideran los siguientes impactos hidrológicos:

- Los cambios en las condiciones del caudal máximo (potencial impacto negativo: inundaciones cada vez mayores);
- Los cambios en las condiciones del caudal promedio anual y mensual; y
- Los cambios en las condiciones del caudal en la época seca (potencial impacto negativo: reducción del flujo base; impacto positivo: incremento del flujo base).

Los impactos hidrológicos típicos de las operaciones mineras se derivan de las siguientes actividades:

- La construcción de nuevos reservorios;
- Las derivaciones de caudal;
- Las transferencias de caudal debido al bombeo (e.g., desaguado del tajo); y
- Los cambios en el uso del suelo.

#### 6.1.1 Nuevos Reservorios

Luego del cierre de la mina, frecuentemente se deja inundar el tajo abierto hasta el nivel estático del agua y éste se convierte en un reservorio. Asimismo, como resultado de las actividades mineras se ha creado un depósito de relaves, una poza de clasificación, un reservorio de agua fresca, pozas de sedimentación y pozas para el control de aguas pluviales.

Los reservorios cambian el régimen hidrológico de caudales atenuando los caudales máximos e incrementando los caudales bajos. Como regla general, un reservorio nuevo en la cuenca constituye un impacto hidrológico positivo.

#### 6.1.2 Derivaciones de Caudal

Las actividades mineras ocasionan cambios paisajísticos locales y la reorientación del drenaje. Algunos ejemplos de derivaciones del caudal son los siguientes:

- Un tajo abierto en la parte superior de una colina, además de convertirse en un reservorio que afecta el régimen del caudal, modifica los límites del área de drenaje.
- La escorrentía no contaminada aguas arriba de un depósito de relaves a menudo se deriva ya sea a las cuencas adyacentes o a las secciones aguas abajo del mismo curso de agua. En cualquier caso, se reduce el flujo de la sección del curso de agua inmediatamente aguas abajo de la estructura de derivación.
- El drenaje proveniente de un botadero de roca de desmonte o de las pilas del mineral de baja ley es derivado para tratamiento.

La importancia del impacto hidrológico de las derivaciones es específica al proyecto y se debe evaluar en cada caso individual. La mayor derivación del caudal se construye, por lo general, alrededor del depósito de relaves (i.e., las derivaciones alrededor de los botaderos de roca de desmonte son generalmente más pequeñas). La derivación de la escorrentía alrededor de un depósito de relaves es una buena práctica de manejo de aguas que ayuda a reducir la contaminación del agua y los requerimientos de tratamiento. El impacto hidrológico de la derivación de aguas alrededor de los relaves es menor que los potenciales impactos negativos en la calidad del agua, los cuales se compensan por el beneficio de menores requerimientos de tratamiento.

El impacto hidrológico de las derivaciones de caudal se puede evaluar mediante el cálculo de las áreas de drenaje. El porcentaje del incremento o la reducción del área de la cuenca es un indicativo del respectivo incremento o la reducción esperada de la escorrentía.

### 6.1.3 Transferencias de Caudal debidas al Bombeo

Se utiliza el bombeo cuando no se pueden lograr las derivaciones del caudal por gravedad (e.g., se debe transferir el agua a una elevación mayor). Algunos ejemplos de transferencia de aguas mediante bombeo en los proyectos mineros son los siguientes:

- La fuente de suministro de agua y el punto descarga de efluentes se ubican en cuencas distintas (la mina extrae agua de una cuenca y luego descarga el efluente en una cuenca distinta).
- El drenaje de la mina. El cono de depresión de las aguas subterráneas a menudo se extiende más allá de la divisoria original de la cuenca y el agua colectada de dos cuencas se descarga en una de ellas. Esto da lugar a una redistribución del caudal entre las cuencas.
- El bombeo de la escorrentía colectada de los botaderos de roca de desmonte a una planta de tratamiento con la posterior descarga a una cuenca diferente.

Generalmente, el bombeo es una actividad de corto a mediano plazo que concluye luego del cierre de la mina.

### 6.1.4 Cambios en el Uso del Suelo

Los cambios en el uso del suelo incluyen el desbroce, la renivelación, la pavimentación, la instalación de revestimientos impermeables (e.g., debajo de las plataformas de lixiviación). Dependiendo de las condiciones específicas del proyecto, en hidrología se puede cuantificar o ignorar el efecto del cambio en el uso de la tierra. Por ejemplo, la instalación de un revestimiento de plataforma de lixiviación puede afectar el flujo base en una quebrada pequeña. Este efecto se puede cuantificar.

El cambio de la escorrentía superficial de las áreas perturbadas. Mientras que la deforestación y la renivelación del terreno cambian el coeficiente de escorrentía, las áreas afectadas son generalmente pequeñas y el resultante impacto hidrológico es local. No es práctico tratar de cuantificar este impacto.

La evaporación cada vez mayor de las superficies de las pozas se compensa mediante la precipitación directa sobre tales superficies. Considerando que las pozas de la mina ocupan un pequeño porcentaje de las áreas de cuenca, el cambio neto puede ser poco significativo para la escorrentía desde la cuenca. Es más importante el efecto regulador de una nueva poza.

## 6.2 IMPACTOS EN LA CALIDAD DE LAS AGUAS

Los impactos en la calidad de las aguas provienen de las descargas de fuente puntual, así como de las fuentes difusas.

### 6.2.1 Fuentes Puntuales

El vertimiento de efluentes en los cuerpos de agua generará impactos locales y extendidos. Los impactos locales están relacionados con la zona de mezcla y la pluma que forma la descarga. Los impactos extendidos son los impactos más permanentes de las descargas y son los que afectan la calidad de las aguas en el largo plazo.

Mediante técnicas de modelamiento numérico se puede predecir si es necesario el efecto local y extendido de la descarga y se pueden diseñar las medidas para limitar tales efectos. El cumplimiento de los límites máximos permisibles de la descarga no necesariamente garantiza que el cuerpo receptor no será afectado en su calidad. Es necesario comprender la dinámica de cada vertimiento bajo los diferentes escenarios hidrológicos que se podrían presentar.

### 6.2.2 Fuentes Difusas

Las fuentes difusas de contaminación de aguas superficiales en una operación minera pueden ser diversas y van desde el arrastre de partículas y contaminantes presentes en los suelos por acción de la precipitación y la escorrentía superficial hasta el arrastre de contaminantes atmosféricos hacia los cuerpos de agua por efecto de la precipitación.

La evaluación de fuentes difusas requiere de una adecuada comprensión de la presencia de contaminantes no localizados (e.g., áreas de suelos contaminados, afloramientos de aguas subterráneas contaminadas, etc.), así como de las fuentes de contaminación atmosférica que podrían incidir en la calidad de las aguas (e.g., emisiones de SO<sub>2</sub> y material particulado a partir de procesos de fundición)<sup>19</sup>.

## 6.3 EJEMPLOS DE MODELAMIENTO

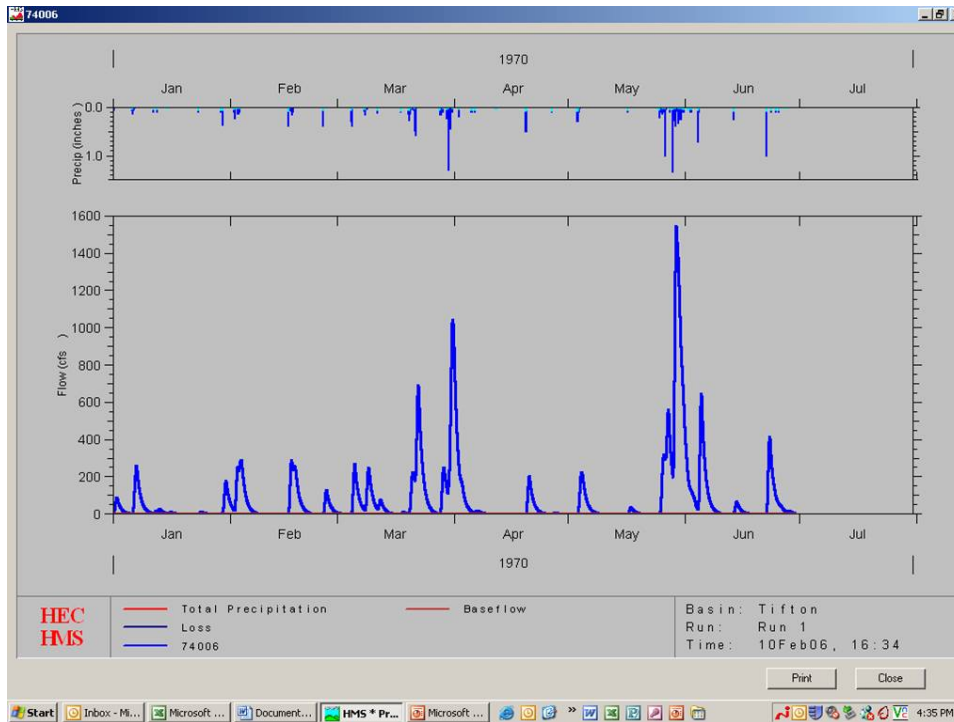
### 6.3.1 Modelos Hidrológicos

Se han desarrollado muchos modelos para calcular las características hidrológicas específicas. Por ejemplo, se utilizan los modelos HEC - HMS para calcular los caudales máximos. Otros modelos más complejos (e.g., GAWSER) se emplean para calcular el rango de las características hidrológicas, desde caudales máximos hasta caudales promedio y caudales bajos.

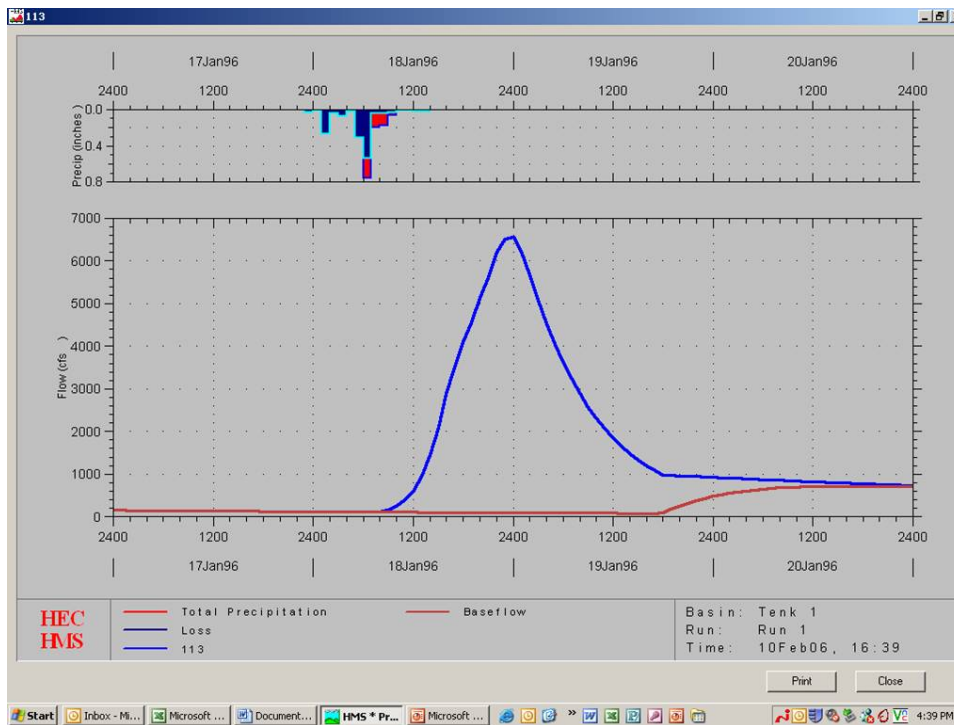
Un ejemplo del resultado del modelo HEC-HMS se ilustra en las Figuras 6-1 y 6-2, donde se muestra la precipitación y el hidrograma de caudal simulado para dos escalas de tiempo distintas.

<sup>19</sup> Véase al respecto la *Guía para la Evaluación de Impactos en la Calidad del Aire por Actividades Mineras*, publicada por el MEM en esta misma colección.

**Figura 6-1** Resultado de la simulación hidrológica continua con HEC-HMS para varios meses



**Figura 6-2** Resultado de la simulación hidrológica continua con HEC-HMS para unos pocos días



Los resultados de una simulación realizada con el modelo GAWSER son mostrados en el Anexo D.

## 6.3.2 Modelo de Balance Hídrico de Todo el Sitio del Proyecto

En los proyectos mineros es una práctica común desarrollar un modelo de manejo de aguas para todo el sitio del proyecto. El modelo incluye todos los procesos hidrológicos y las actividades de manejo de aguas, incluyendo precipitación, evaporación, escorrentía, derivaciones de caudal y bombeo. El modelo del balance hídrico de toda el área del proyecto sólo se puede desarrollar cuando se han caracterizado la línea base de hidrología y los flujos del proceso.

El propósito del modelo de balance hídrico de toda el área del proyecto consiste en calcular la demanda de agua y la calidad del agua para el proyecto desde el inicio hasta el cierre. El modelo del balance hídrico de toda el área del proyecto se desarrolla para las condiciones de línea base, y las etapas de construcción, la operación y el cierre de los proyectos mineros. La comparación entre los caudales simulados en los lugares de interés de las diferentes etapas del proyecto ayuda a evaluar los impactos hidrológicos. Los resultados simulados se deben analizar desde la perspectiva de los cambios físicos propuestos al sistema de caudales (e.g., el caudal cada vez mayor deberá ser consistente con el área de drenaje cada vez mayor debido a la derivación del caudal o al bombeo de la descarga de agua). Confiar en los resultados de modelamiento sin verificarlos desde la perspectiva física es una práctica inaceptable y precaria.

En el Anexo E se muestra un ejemplo de un balance hídrico de toda el área del proyecto, desarrollado en GOLDSIM para el proyecto Alto Chicama.

## 6.3.3 Modelos de Calidad de Aguas

Para el proyecto Alto Chicama se realizó también un modelo de mezcla simple para predecir la calidad de las aguas como consecuencia del desarrollo del proyecto. Este modelo fue desarrollado también el GOLDSIM y se muestra en el Anexo E.

La mayoría de los casos de evaluación del impacto ambiental de proyectos mineros, un modelo de mezcla simple puede ser suficiente para contar con la información necesaria para la toma de decisiones sobre el manejo ambiental de la operación. No obstante, si se requiriera desarrollar evaluaciones de riesgo ambiental a la salud humana o a la ecología probablemente estos modelos no sean suficientemente detallados y se requiera aplicar modelos que tomen en cuenta los mecanismos de advección y dispersión, así como las posibles reacciones químicas o bioquímicas que podría sufrir el contaminante en estudio.

## 6.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS

La mayoría de modelos hidrológicos son multipropósito, generales y generan grandes cantidades de datos que pueden ser utilizados por una variedad de usuarios para diversos proyectos. Para un proyecto específico, es importante identificar las preguntas clave que se deben analizar (e.g., si el proyecto causará un incremento en las inundaciones o una reducción del caudal en el río) y luego identificar la porción del resultado del modelo que ayuda a dar respuesta a esa pregunta. Por ejemplo, si el desborde de la presa es un problema, entonces se debería comparar el nivel máximo del agua simulado con la elevación de la cresta de la presa que proporciona una indicación directa sobre la ocurrencia o no del desborde. Otros resultados del modelo (e.g., caudal máximo, tiempo que toma alcanzar el nivel máximo) no se utilizan en esta

comparación directa pero pueden ser útiles y se pueden emplear para otros propósitos.

Comprender el sistema físico es fundamental para la interpretación de los resultados de modelamiento. Los resultados de modelamiento se deben evaluar desde la perspectiva de los cambios físicos propuestos para el sistema de caudal.



## 7. REFERENCIAS

- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCMA). 2004. *Environmental Quality Standards*.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2006. *Evapotranspiración del cultivo - Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos - Estudios FAO: Riego y Drenaje 56*. Preparado por Richard Allen, Luis Pereira, Dirk Raes y Martin Smith. Traducción de la versión en inglés de 1998. Disponible en versión electrónica en <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>
- Golder. 2004. *Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Alto Chicama*. Lima, Golder Associates.
- . 2007. *Estudio de Impacto Ambiental de la Ampliación del Proyecto Antamina*. Lima, Golder Associates.
- Gulliver, John S. 2007. *Introduction to Chemical Transport in the Environment*. Cambridge University Press.
- Hayward, Steven F. 2003. *Environmental Policy Outlook*. AEI Online (Washington), April 1, 2003.
- Henderson-Sellers, Brian. 1991. *Water Quality Modeling - Volume IV: Decision Support Techniques for Lakes and Reservoirs*. CRC Press Inc.
- Lung, Wu-Seng. 1993. *Water Quality Modeling - Volume III: Application to Estuaries*. CRC Press Inc.
- Martin, James L.; y McCutcheon, Steven C. 1999. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. Lewis Publishers.
- McCutcheon, Steve C.; y French, Richard H. 1993. *Water Quality Modeling - Volume I: Transport and Surface Exchange in Rivers*. CRC Press Inc.
- Ministerio de Energía y Minas (MEM). 1994. *Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aguas*. Lima, MEM. Publicada mediante R.D. N° 004-94-EM/DGAA (02/03/1994).
- Streeter, H. W.; y Phelps, E.B. 1925. *A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River*. Public Health Bulletin 146. Treasury Department, US Public Health Service, Washington D.C.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2002. *National Recommended Water Quality Criteria*.
- . 2003. *National Primary Drinking Water Standards*.
- World Bank Group (WBG). 1998. *Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998: Toward Cleaner Production*. The World Bank Group in Collaboration with the United Nations Environmental Program and the United Nations Industrial Development Organization. Washington, D.C., Julio 1998.

## Referencias

---

World Health Organization (WHO). 2004. *Guidelines for Drinking Water*.

Zheng, Chungmiao; y Bennett, Gordon D. 2002. *Applied Contaminant Transport Modeling*. Segunda edición. Wiley,

**Anexo A**  
**Ejemplo de Error en las**  
**Unidades de Datos de**  
**Precipitación Reportados**



**Sección** ..... **Página**

## LISTA DE TABLAS

Tabla A1	Campamentos de Quiruvilca.....	83
Tabla A2	Datos de Tiempo Campamento Shorey.....	84
Tabla A3	Precipitación Diaria (mm).....	85



## Anexo A

Los datos adjuntos fueron obtenidos de la estación Quiruvilca para los fines del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Alto Chicama. En estos datos se observa una fuerte distorsión debida a un error en las unidades de reporte de los datos.

A partir de los datos adjuntos se pueden elaborar las siguientes observaciones:

- Hasta el 31 de octubre de 1995, la precipitación se reportó en pulgadas. La tabla no indica las unidades de manera explícita, sino que lo advertimos a partir del análisis de datos (Tabla A1).
- Desde el 1 de noviembre de 1995, las unidades de mediciones se cambiaron a milímetros. Desde noviembre de 1995, las unidades se indican en el encabezado de la tabla (Tabla A2).
- Los registros se combinaron en una hoja de cálculo única para almacenar los datos anuales en una sola tabla (Tabla A3). La tabla resultante fue incorrecta debido a que se mezclaron las unidades.

**Tabla A1 Campamentos de Quiruvilca**

NORTHERN PERU MINING CORP.

DATOS METEOROLÓGICOS

MES DE OCTUBRE DE 1995

FECHA	TEMPERATURA		HUMEDAD RELATIVA				PRECIPITACIONES
	MÁX	MÍN	08:00 a.m.	12:00 M	04:00 p.m.	PROMEDIO	
1							0.09
2							0.00
3							0.07
4							0.00
5							0.00
6							0.00
7							0.00
8							0.01
9							0.00
10	21.0	2.0					0.00
11	24.0	0.0					0.00
12	24.0	2.0					0.00
13	24.0						0.00
14							0.00
15							0.00
16	19.0	2.0					0.01
17	21.0	6.0					0.06
18	20.0	6.0					0.30
19	13.0	5.0					0.50
20	19.0	3.0					0.23
21							0.24
22							0.00
23	15.0	3.0					1.07
24	16.0	5.0					0.55
25	14.0	3.0					0.78
26	16.0	4.0					0.16
27	14.0	5.0					0.00
28							0.18
29							0.10
30	13.0	4.0					0.60
31	11.0	5.0					0.50
PROMEDIO	17.8	3.7					5.45
ACULUMADO A LA FECHA							35.47

# Anexo A

**Tabla A2 Datos de Tiempo Campamento Shorey**

SHOREY,  
06 de Diciembre de 1995

FECHA	TEMPERATURA		HUMEDAD RELATIVA	LLUVIA MILÍMETROS
	MAX	MIN	PROMEDIO	
1			0.00	15.24
2	4	15	0.00	10.41
3	3	14	0.00	3.56
4	3	16	0.00	1.52
5	3	16	0.00	6.61
6	3	16	0.00	6.11
7	5	16	0.00	6.60
8	5	14	0.00	4.32
9	2	16	0.00	2.03
10	5	16	0.00	2.54
11			0.00	1.52
12			0.00	5.08
13	4	14	0.00	9.65
14	5	14	0.00	5.08
15	6	14	0.00	23.37
16	4	15	0.00	0.76
17	5	15	0.00	4.32
18			0.00	5.08
19			0.00	4.06
20	4	14	0.00	5.08
21	5	14	0.00	0.00
22	2	15	0.00	0.00
23	2	25	0.00	0.00
24	2	20	0.00	0.00
25			0.00	0.00
26			0.00	0.00
27	0	26	0.00	0.00
28	2	24	0.00	0.00
29	5	14	0.00	0.00
30	2	19	0.00	0.00
31			0.00	0.00
	3.5	16.6	0.00	122.94

4.10



# Anexo A

**Tabla A3 Precipitación Diaria (mm)**

Mes	Día							
		1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Octubre	11	0	0	0	0.0	0	6.1	11.4
Octubre	12	0	0	0	0.0	0	0.0	11.9
Octubre	13	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
Octubre	14	0	0	1	0.0	1	0.0	0.0
Octubre	15	0	0	0	0.0	11	0.0	0.0
Octubre	16	0	0	0	0.0	7	0.0	1.8
Octubre	17	0	0	0	0.1	6	0.0	7.6
Octubre	18	0	0	0	0.3	6	0.0	0.0
Octubre	19	0	0	0	0.5	3	0.0	12.5
Octubre	20	0	0	0	0.2	2	0.0	25.4
Octubre	21	0	0	0	0.2	14	7.4	1.8
Octubre	22	0	0	0	0.0	5	14.5	8.6
Octubre	23	0	0	0	1.1	5	10.2	24.1
Octubre	24	0	0	0	0.6	5	5.6	18.5
Octubre	25	0	0	0	0.8	0	6.1	15.8
Octubre	26	1	0	0	0.2	0	5.1	2.3
Octubre	27	1	0	0	0.0	4	22.6	5.1
Octubre	28	1	1	0	0.2	0	0.3	2.5
Octubre	29	0	0	0	0.1	15	4.6	13.2
Octubre	30	0	0	0	0.6	12	7.4	16.5
Octubre	31	0	0	0	0.5	5	6.4	5.1
Noviembre	1	0	0	0	15.2	9	2.5	4.1
Noviembre	2	0	1	1	10.4	8	2.5	0.0
Noviembre	3	0	1	0	3.6	8	14.7	0.0
Noviembre	4	0	0	0	1.5	1	7.1	0.0
Noviembre	5	0	0	0	6.6	8	4.3	0.0
Noviembre	6	0	0	0	6.1	1	2.8	0.0
Noviembre	7	0	0	1	6.6	7	16.5	0.0
Noviembre	8	0	0	1	4.3	0	6.4	0.0
Noviembre	9	0	1	0	2.0	0	17.8	0.0
Noviembre	10	0	0	0	2.5	0	8.4	0.0



**Anexo B**  
**Ejemplo de Cálculos de**  
**Aseguramiento y Control de**  
**Calidad de los Análisis Químicos**



<b>Sección .....</b>	<b>Página</b>
<b>B1. Ejemplo de Diferencia Porcentual Relativa.....</b>	<b>91</b>
<b>B2. Ejemplo de Cálculo de Balance de Cargas.....</b>	<b>91</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla B1	Cálculo de Diferencia Porcentual Relativa.....	91
Tabla B2	Balance de Cargas con Error Menor al 10%.....	92
Tabla B3	Balance de Cargas con Error Mayor al 10%.....	92



## Anexo B

### B1. EJEMPLO DE DIFERENCIA PORCENTUAL RELATIVA

Para los análisis de los duplicados de calidad de agua superficial enviados al laboratorio, se evalúa utilizando la Diferencia Porcentual Relativa (DPR) a los valores de la muestra duplicada y de la muestra original, que son igual o mayores que cinco veces el Límite de Método de Detección (LMD). Si la muestra duplicada o la original es menor que cinco veces el (LMD), se aplica un límite de control igual a LDM. La DPR se calcula según la siguiente ecuación:

$$DPR = [(SR-SRD)/((SR+SRD)/2)]*100$$

Donde SR es el resultado de la muestra primaria y SRD es el resultado de la muestra duplicado. Si se supera el límite de control (p.e. 20%), todos los resultados relacionados se consideran como estimados. Si ambas muestras son no detectables, no se calcula el DPR.

En los ejemplos a continuación, se observa que los duplicados de parámetros: sólidos totales disueltos y sulfatos, tienen valores de DRP aceptables; mientras que los parámetros sólidos totales suspendidos y fósforo total están por encima del 20% del límite de control. No se pueden calcular los DRP para el sulfuro y el cianuro libre puesto que tienen valores por debajo de los límites de detección, y tampoco se puede calcular el DRP para el nitrógeno amoniacal porque los valores de la muestra primaria y duplicada no son 5 veces mayores a los límites de detección.

**Tabla B1 Cálculo de Diferencia Porcentual Relativa**

Parámetros	Unidades	Límite de Detección	Valor para comparación (5 veces el Límite Detección)*	AS-BA-01	AS-BA-02	DRP
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	10	50	35420	36940	4,20
<b>Sólidos Totales Suspendidos</b>	<b>mg/L</b>	<b>3,0</b>	<b>15</b>	<b>1252</b>	<b>704</b>	<b>56,03</b>
Sulfato	mg/L	10	50	2698	2736	1,4
Sulfuro	mg/L	0,002	0,01	<0,002	<0,002	
Cianuro Libre	mg/L	0,005	0,025	<0,005	<0,005	
<b>Fósforo Total</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,03</b>	<b>0,15</b>	<b>10,6</b>	<b>3,62</b>	<b>98,17</b>
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,04	0,2	0,05	0,04	**

\* Para poder validar el cálculo de DRP, el valor de ambas muestras primaria y duplicado debe ser 5 veces mayor al Límite de Detección.

\*\* Muestras con DRP no significativos por tener valores menores a 5 veces el límite de detección.

### B2. EJEMPLO DE CÁLCULO DE BALANCE DE CARGAS

Para el cálculo de error de balance de carga, se realiza un análisis completo de iones principales ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$ ) y otros iones que pudiesen estar presentes en concentraciones significativas. El cálculo del balance de carga es una práctica estándar para evaluar la exactitud de los análisis de agua. La electroneutralidad (E.N.) de una solución significa que la suma de cationes en la

## Anexo B

solución (expresada en meq/L) debe ser igual a la suma de los aniones. Por lo general se considera aceptable un error de balance de carga menor de 10%.

En los ejemplos a continuación se muestra el balance de carga para dos muestras, una con un balance de carga aceptable con un valor menor al 10% y otra que supera este valor.

**Tabla B2 Balance de Cargas con Error Menor al 10%**

Unidad		Cationes				Aniones			
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Concentración	mg/L	29,44	4,43	24	146	6	0	479	0,43
Molaridad	mmol/L	1,28	0,11	0,99	3,64	0,17	0,00	4,99	0,01
Normalidad	meq/L	1,28	0,11	1,97	7,29	-0,17	0,00	-9,97	-0,01

<b>Suma cationes</b>	<b>10,65</b>
<b>Suma aniones</b>	<b>-10,15</b>
<b>Diferencia</b>	<b>0,50</b>
<b>Error</b>	<b>2,43%</b>

La molaridad se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Molaridad (mmol / L)} = \frac{\text{Concentración (mg / L)}}{\text{Peso Molecular (mg / mmol)}}$$

Para calcular la Normalidad (i.e., el número de equivalentes por litro) se utiliza la fórmula:

$$\text{Normalidad (meq/L)} = \text{Molaridad (mmol/L)} \times \text{Carga}$$

**Tabla B3 Balance de Cargas con Error Mayor al 10%**

Unidad		Cationes				Aniones			
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Concentración	mg/l	24,05	4,429	28,75	197,3	0,5	0	1232,9	0,05
Concentración	mmol/l	1,05	0,11	1,18	4,92	0,01	0,00	12,83	0,00
Normalidad	meq/l	1,05	0,11	2,37	9,85	-0,01	0,00	-25,67	0,00

<b>Suma cationes</b>	<b>13,37</b>
<b>Suma aniones</b>	<b>-25,68</b>
<b>Diferencia</b>	<b>-12,31</b>
<b>Error</b>	<b>31,53%</b>



**Anexo C**  
**Teorema del Transporte de Reynolds**



---

Sección .....Página

**LISTA DE FIGURAS**

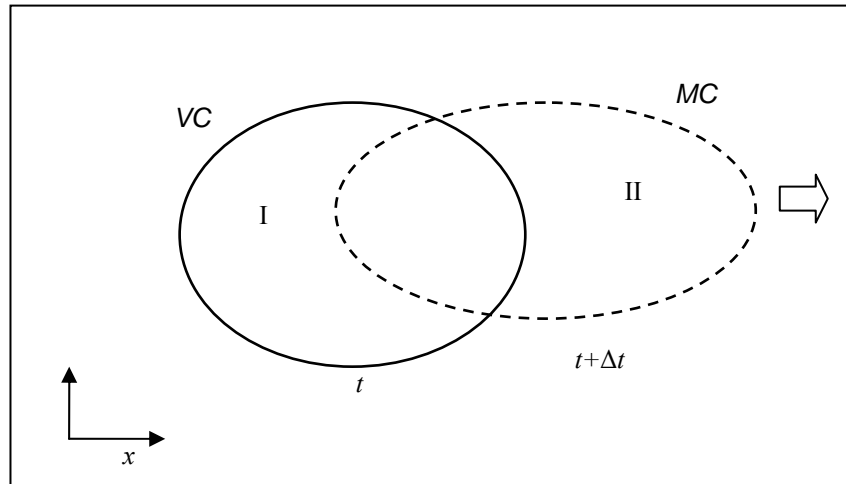
Figura C1 Relación entre el Volumen de Control y la Masa de Control ..... 97



Existen dos métodos generales para describir el comportamiento de un fluido: el método Euleriano y el método Lagrangiano. En el método Euleriano se observan las propiedades del fluido (e.g., velocidad, concentración de la sustancia x, etc.) en posiciones fijas en el espacio. En cambio en el método Lagrangiano el observador sigue el movimiento de las partículas del fluido, independientemente de su posición en el espacio. Es posible convertir un método al otro mediante la aplicación del Teorema de Transporte de Reynolds

Para tal efecto, se define el Volumen de Control como un volumen con una posición fija en el espacio (la línea continua en la Figura C-1) y la Masa de Control como la masa del fluido inicialmente contenida en el VC. Luego de un tiempo  $\Delta t$ , la masa de control se ha desplazado a la posición mostrada con línea discontinua en la Figura C-1.

**Figura C1 Relación entre el Volumen de Control y la Masa de Control**



Sea  $\Phi$  el valor de una propiedad del sistema. Luego, el cambio de esta propiedad cuando el sistema pasa de  $t$  a  $t + \Delta t$  es:

$$\Delta\Phi_M = \Phi_{M,t+\Delta t} - \Phi_{M,t} \quad (C-1)$$

donde estos valores están referidos a la masa de control.

Como al inicio la masa de control coincide con el volumen de control,

$$\Delta\Phi_{M,t} = \Phi_{V,t}, \quad (C-2)$$

donde V representa el volumen de control.

En el instante  $t + \Delta t$ , el valor de  $\Phi$  está dado por

$$\Phi_{M,t+\Delta t} = \Phi_{V,t+\Delta t} - \Phi_{I,t+\Delta t} + \Phi_{II,t+\Delta t} \quad (C-3)$$

Combinando (C-1) y (C-2) en (C-3) tenemos

$$\Delta\Phi_M = \Phi_{V,t+\Delta t} - \Phi_{I,t+\Delta t} + \Phi_{II,t+\Delta t} - \Phi_{V,t} \quad (C-4)$$

Reacomodando los términos y dividiendo entre  $\Delta t$

$$\frac{\Delta\Phi_M}{\Delta t} = \frac{\Phi_{V,t+\Delta t} - \Phi_{V,t}}{\Delta t} - \frac{\Phi_{I,t+\Delta t}}{\Delta t} + \frac{\Phi_{II,t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (C-5)$$

El primer miembro de esa ecuación es una función únicamente de t, por lo que en el límite, ésta se convierte en la derivada total

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_M}{\Delta t} = \frac{D\Phi_M}{Dt} = \frac{D}{Dt} \int_M \varphi \rho dV \quad (C-6)$$

donde  $\varphi$  es el valor de la propiedad  $\Phi$  por unidad de masa del fluido y  $\rho$  es la densidad del fluido.

El primer término del segundo miembro de la ecuación (C-5) es función de t y de V, por lo que en el límite, se convierte en la derivada parcial.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Phi_{V,t+\Delta t} - \Phi_{V,t}}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_M \varphi \rho dV \quad (C-7)$$

Los dos últimos términos del segundo miembro de la ecuación (C-5) representan la variación de la propiedad  $\Phi$  debida a la masa de fluido que atraviesa la frontera del volumen de control, i.e., el flujo que ingresa o sale del volumen de control. El flujo está dado por el producto entre la velocidad y el área perpendicular a dicho flujo. Entonces en el límite

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( -\frac{\Phi_{I,t+\Delta t}}{\Delta t} + \frac{\Phi_{II,t+\Delta t}}{\Delta t} \right) = \oint_S \varphi \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS \quad (C-8)$$

Sustituyendo (C-6), (C-7) y (C-8) en (C-5) se obtiene

$$\frac{D}{Dt} \int_M \varphi \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \varphi \rho dV + \int_A \varphi \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (C-9)$$

La ecuación (C-9) constituye la forma integral del teorema de transporte de Reynolds.

De acuerdo con el teorema de Gauss-Green (ver Glosario), el segundo término del segundo miembro de (C-9) puede ser expresado en función del volumen de control:

$$\oint_S \varphi \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_V \nabla \cdot (\varphi \rho \vec{v}) dV \quad (C-10)$$

Reemplazando (C-10) en (C-9) y eliminando las integrales se obtiene la forma diferencial del teorema de transporte de Gauss-Green.

$$\frac{D}{Dt} (\varphi \rho) = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi \rho) + \nabla \cdot (\varphi \rho \vec{v}) \quad (C-11)$$

El segundo término del segundo miembro de (C-11) puede ser desarrollado por la regla de la cadena

$$\nabla \bullet (\varphi \rho \vec{v}) = \nabla(\varphi \rho) \bullet \vec{v} + (\varphi \rho) \nabla \bullet \vec{v} \quad (\text{C-12})$$

Pero si el fluido es incompresible, entonces  $\nabla \bullet \vec{v} = 0$ , por lo que la ecuación (C-11) se reduce a

$$\frac{D}{Dt}(\varphi \rho) = \frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho) + \nabla(\varphi \rho) \bullet \vec{v} \quad (\text{C-13})$$

En particular, si  $\varphi = c'$ , la concentración de un contaminante dado por unidad de masa del fluido, entonces  $\varphi \rho = c' \rho = c$ , donde  $c$  es la concentración del contaminante por unidad de volumen y la ecuación (C-13) se convierte en

$$\frac{Dc}{Dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla c \bullet \vec{v} = \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} \quad (\text{C-14})$$





**Anexo D**  
**Ejemplo de Simulación**  
**Hidrológica realizada**  
**con el Modelo GAWSER**



**Sección .....Página**

**LISTA DE TABLAS**

Tabla D1	Resultados del Hidrograma Simulado.....	108
Tabla D2	Parámetros de control de la simulación.....	109
Tabla D3	Balance hídrico .....	110
Tabla D4	Descargas máximas anuales .....	110
Tabla D5	Resultados del análisis de frecuencias de las descargas máximas .....	111
Tabla D6	Descargas mínimas de 7 días.....	112
Tabla D7	Análisis de frecuencia de las descargas mínimas .....	113
Tabla D8	Resumen de la duración de los caudales .....	113

**LISTA DE FIGURAS**

Figura D1	Mapa del Área Modelada .....	106
Figura D2	Esquema del Modelo .....	107



En este Anexo se muestra el resultado de una simulación realizada con el modelo GAWSER.

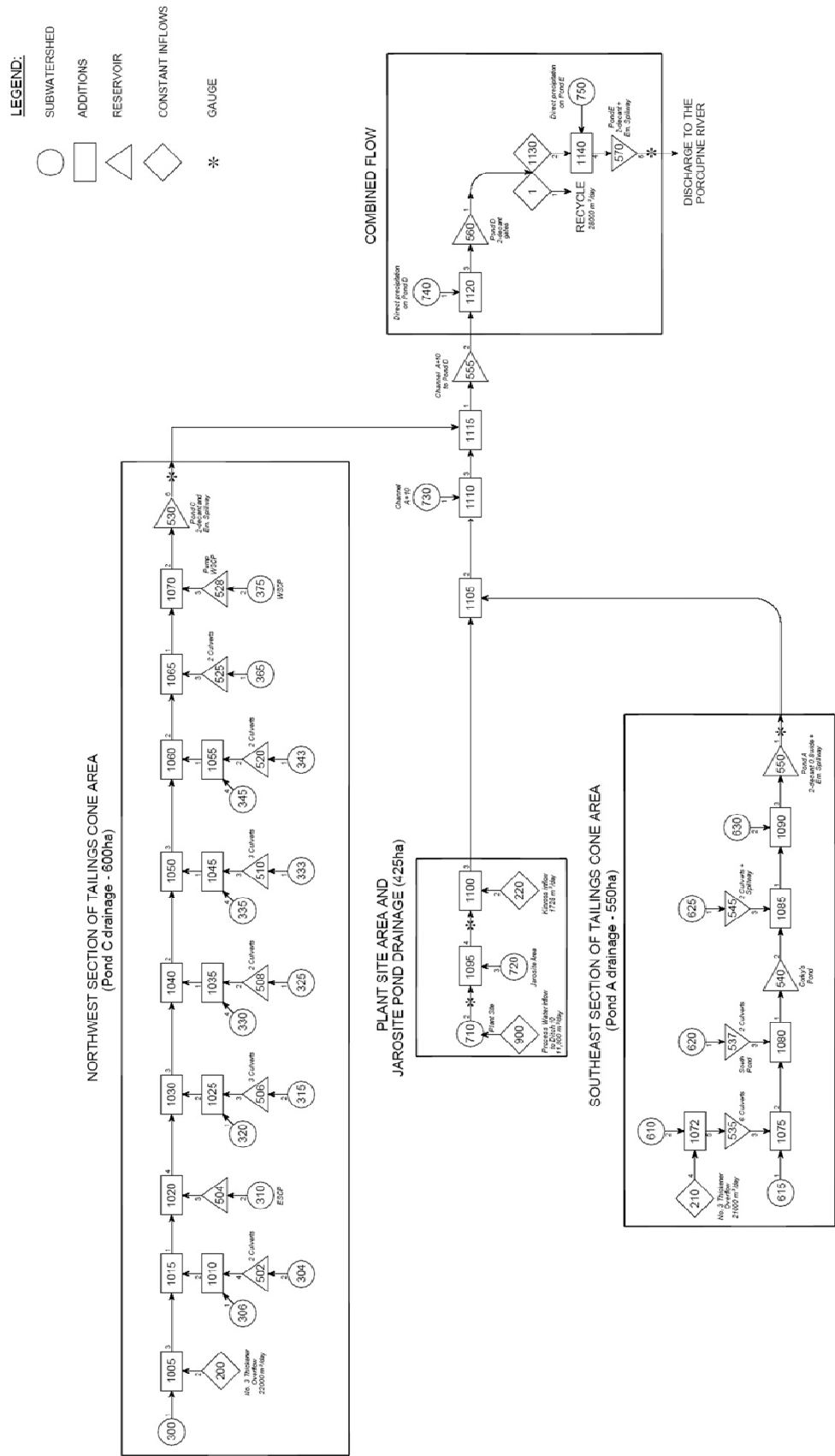
La cuenca de simulación fue bastante compleja. Para efectos del análisis, el área de la cuenca fue discretizado en diversas sub-cuencas (Figura D-1). La Figura D-2 ilustra el esquema de modelamiento correspondiente.

Se desarrollaron tanto simulaciones de un evento como simulaciones continuas. Se utilizó como dato un evento de tormenta de diseño de 6 horas de duración, con período de retorno de 25 años para la simulación de un evento. Como dato del modelo se emplearon el registro de la precipitación horaria para el período comprendido entre 1955 y 1996 (42 años) y las propiedades de la cuenca. El resultado del modelo incluye la siguiente información:

- Todas las áreas de drenaje y los caudales máximos simulados, los volúmenes de escorrentía y los tiempos que toman alcanzar el pico máximo de la simulación del evento (Tabla D-1)
- La página de títulos y los parámetros de control de la simulación (Tabla D-2).
- El balance hídrico mensual y anual (precipitación, evapotranspiración, escorrentía y flujo base) (Tabla D-3).
- Las descargas simuladas máximas anuales (Tabla D-4).
- Las características estadísticas de los caudales máximos anuales (Tabla D-5).
- Los caudales bajos anuales promedio de 7 días simulados (Tabla D-6).
- Las características estadísticas de los caudales de la época seca (Tabla D-7).
- El resumen de la duración del caudal (Tabla D-8).



Figura D2 Esquema del Modelo



# Anexo D

**Tabla D1 Resultados del Hidrograma Simulado**

OUTFLOW HYDROGRAPH SUMMARY  
=====

EXAMPLE OF HYDROLOGICAL MODEL OUTPUT

25-year 6-hour Storm

SCENARIO I: NOWL 0.5 m Below Base Case

HYDROGRAPH NUMBER	UPSTREAM DRAINAGE AREA Sq.km	VOLUME mm	PEAK DISCHARGE cms	TIME TO PEAK HRS
300	0.5100	40.36	2.818	4.000
1005	0.5110	212.74	3.073	4.000
304	0.4400	39.97	2.364	3.750
502	0.4400	39.97	0.979	5.250
306	0.0600	40.15	0.440	3.250
1010	0.5000	39.99	1.041	4.250
1015	1.0110	127.30	4.076	4.000
310	0.1000	40.16	0.522	4.250
504	0.1000	60.48	0.032	0.000
1020	1.1110	121.29	4.108	4.000
315	0.7500	39.97	3.665	4.250
506	0.7500	39.97	1.328	6.000
320	0.3500	39.97	1.642	4.500
1025	1.1000	39.97	2.702	4.750
1030	2.2110	80.83	6.380	4.250
325	0.5700	39.97	2.893	4.250
508	0.5700	39.97	0.960	5.750
330	0.1500	39.96	0.923	3.750
1035	0.7200	39.97	1.395	4.000
1040	2.9310	70.79	7.768	4.250
333	0.6500	39.97	3.269	4.250
510	0.6500	39.97	1.327	5.750
335	0.1300	39.96	0.855	3.250
1045	0.7800	39.97	1.451	4.750
1050	3.7110	64.32	9.181	4.250
343	0.3500	39.97	1.758	4.000
520	0.3500	39.97	0.850	5.500
345	0.6700	43.49	2.976	5.000
1055	1.0200	42.28	3.811	5.000
1060	4.7310	59.56	12.424	4.750
365	0.7600	39.97	3.539	4.500
525	0.7600	39.97	1.168	6.250
1065	5.4910	56.85	13.374	4.750
375	0.4700	39.98	1.324	7.000
528	0.4700	52.84	0.063	0.000
1070	5.9610	56.54	13.437	4.750
530	5.9610	58.19	6.622	7.500
610	0.7600	39.97	3.834	4.250
1072	0.7610	150.27	4.077	4.250
535	0.7610	150.27	2.300	5.500
615	0.8400	51.09	4.728	4.250
1075	1.6010	98.24	6.564	4.500
620	0.9100	39.97	4.070	4.500
537	0.9100	36.45	0.152	9.000
1080	2.5110	75.84	6.612	4.500
540	2.5110	75.48	1.039	8.750
625	1.4600	39.98	6.201	4.750
545	1.4600	39.97	2.142	6.750
1085	3.9710	62.43	3.140	6.750
630	1.5500	42.52	4.395	7.250
1090	5.5210	56.84	7.471	7.250
550	5.5210	60.37	2.362	13.250
710	2.0500	40.38	4.611	7.500
1094	2.0501	62.81	4.741	7.500
720	2.1200	40.37	7.024	4.500
1095	4.1701	51.40	7.230	7.000
1100	4.1711	53.05	7.250	7.000
1105	9.6921	57.22	8.462	7.250
10	9.6921	57.32	7.907	8.000
730	0.5400	46.22	2.289	4.750



# Anexo D

1110	10.2321	56.64	9.718	4.750
1115	16.1931	57.21	15.828	7.000
555	16.1931	58.36	9.269	11.750
740	0.4600	58.70	2.400	4.000
1120	16.6531	58.37	9.300	11.500
560	16.6531	59.40	4.062	21.000
1131	16.6531	10.49	0.324	0.000
1130	16.6531	48.91	3.738	21.000
750	0.6700	55.00	4.136	4.000
1140	17.3231	49.15	4.637	4.000
570	17.3231	46.65	2.393	44.250

Note: \* Storage/outflow table exceeded  
# Rating curve exceeded

## WATERSHED RESPONSE VOLUMES ( mm )

=====

RAIN/SNOWMELT= 60.900  
OVERLAND= 41.895  
SUBSURFACE= 0.379  
GROUNDWATER= 0.042  
SS NET= 16.840  
GW NET= 1.871  
EVAPORATION= 0.000  
SUBLIMATION= 0.000

DRAINAGE AREA IN RUNOFF COMPUTATIONS= 17.320 km<sup>2</sup>

## Tabla D2 Parámetros de control de la simulación

GAWSER V6.9.4 - Released - Nov. 09, 2002

=====

Mine Site Watershed Model  
Generalized Water Balance Summary  
1955 to 1996

=====

Input file 1=WBSUM2.DAT  
Input file 2=  
Output file =WBSUM2.TXT

\* ===== \*

START  
KUNITS=2  
TOTAL WATERSHED AREA=17.32 SQ KM  
INITIAL BASEFLOW AT OUTLET: QBSS= 0.0000 QBGW= 0.000  
PRINT OPTIONS: ECHO=3 OUTPUT=1 PLOTS=0 RCS=1 SUBW=1  
PLOT CUTOFF=576 SUM=4 FREE=0  
PARAMETER ADJUSTMENT FACTORS: FDS=1.00 FKEFF=0.25  
FCS=0.30 FD=0.30 FSAV=1.0 FKO=1.00 FKSS=1.0 FKMF=1.00  
INITIAL SOIL/SNOW WATER FACTORS:  
FIMCI=1.00 FIMCII=1.00 FIWE=0.0000  
GLOBAL RAINFALL SCALING FACTOR: GFRF=1.0000  
SIMULATION CONTROLS: TTI=1.00000 IDEL=2 HOURS=576  
SUBWATERSHED INITIAL BASEFLOWS: -999

# Anexo D

**Tabla D3 Balance hídrico**

WATER BALANCE SUMMARY FOR HYDROGRAPH 530

Location: Hydrograph 530  
 Scenario File: WBSUM2.DAT  
 Period: 1955/10/01 to 1996/10/01 Area: 5.9600 km<sup>2</sup>

Water Balance Quantities (in mm)

Month	Precip	ET	Runoff	Infiltration (Baseflow)	(Losses)	Total Flow
JAN	23.0	9.6	0.0	116.4	-103.1	116.5
FEB	20.3	8.8	0.8	108.0	-97.4	108.9
MAR	40.2	8.1	21.7	118.9	-108.6	140.6
APR	50.7	13.9	98.7	137.5	-199.4	236.2
MAY	67.9	81.0	33.9	126.3	-173.2	160.2
JUN	90.7	100.7	11.9	117.8	-139.8	129.7
JUL	89.0	101.5	10.2	120.4	-143.0	130.6
AUG	87.2	74.6	9.1	120.1	-116.6	129.2
SEP	91.9	56.2	11.1	117.0	-92.4	128.1
OCT	77.5	32.6	22.9	126.6	-104.6	149.5
NOV	71.0	10.8	18.4	124.9	-83.1	143.3
DEC	38.3	9.6	2.2	124.8	-98.4	127.0
Total	747.7	507.5	241.0	1458.7	-1459.6	1699.7

**Tabla D4 Descargas máximas anuales**

Return Period Frequency Analysis, Flow Summary

Station: Hydrograph 530

Month (1)	Year (2)	Discharge (3) (cms)	Ordered (4) (cms)	Rank (5)	Prob. (6) (%)	Ret. Period (7) (Years)
10	1956	2.448	5.254	1	1.22	81.667
11	1957	3.377	4.717	2	3.27	30.625
8	1958	2.005	4.635	3	5.31	18.846
4	1959	2.625	4.502	4	7.35	13.611
11	1960	3.747	4.467	5	9.39	10.652
5	1961	4.420	4.451	6	11.43	8.750
4	1962	2.233	4.420	7	13.47	7.424
8	1963	2.079	4.271	8	15.51	6.447
10	1964	2.780	4.114	9	17.55	5.698
5	1965	3.377	3.874	10	19.59	5.104
4	1966	3.322	3.747	11	21.63	4.623
5	1967	3.730	3.730	12	23.67	4.224
6	1968	3.572	3.714	13	25.71	3.889
4	1969	2.741	3.572	14	27.76	3.603
6	1970	4.451	3.474	15	29.80	3.356
5	1971	3.035	3.377	16	31.84	3.141
5	1972	2.870	3.377	17	33.88	2.952
3	1973	2.841	3.336	18	35.92	2.784
4	1974	3.149	3.322	19	37.96	2.634
4	1975	2.226	3.304	20	40.00	2.500
4	1976	3.874	3.221	21	42.04	2.379
3	1977	3.714	3.176	22	44.08	2.269
7	1978	2.483	3.149	23	46.12	2.168
6	1979	4.502	3.035	24	48.16	2.076
4	1980	2.195	2.909	25	50.20	1.992
5	1981	2.108	2.870	26	52.24	1.914

## Anexo D

10	1982	4.271	2.844	27	54.29	1.842
4	1983	2.710	2.841	28	56.33	1.775
6	1984	3.336	2.780	29	58.37	1.713
4	1985	2.844	2.750	30	60.41	1.655
8	1986	2.267	2.741	31	62.45	1.601
7	1987	1.950	2.710	32	64.49	1.551
11	1988	4.717	2.625	33	66.53	1.503
4	1989	2.091	2.528	34	68.57	1.458
7	1990	5.254	2.483	35	70.61	1.416
3	1991	4.114	2.365	36	72.65	1.376
4	1992	4.635	2.267	37	74.69	1.339
4	1993	2.243	2.249	38	76.73	1.303
4	1994	2.154	2.243	39	78.78	1.269
11	1995	2.528	2.233	40	80.82	1.237
5	1996	3.176	2.226	41	82.86	1.207

**Tabla D5 Resultados del análisis de frecuencias de las descargas máximas**

Frequency Analysis Results

=====

Station: Hydrograph 530

Sample Statistics

	Mean	Std.	Skew	Kurt	
X Series	3.098	0.892	0.456	2.707	
LN X Series	1.090	0.292	-0.171	2.972	
LN(X-A), MM	1.766	0.149	0.164	2.613	A= -2.816
LN(X-A), RM	1.532	0.188	0.082	2.653	A= -1.609
EV1 U=	2.594	0.892	0.456	2.707	Alpha= 1.144

X(MIN)= 1.331                      Sample Size= 49

X(MAX)= 5.254

Flood Frequency Regime

=====

Return Period	LN Flood	LN3PM Flood	LN3PR Flood	EV1 Flood
1.25	2.330	2.350	2.340	2.370
2.00	2.970	3.030	3.020	2.950
5.00	3.800	3.810	3.810	3.740
10.00	4.320	4.260	4.280	4.260
20.00	4.810	4.660	4.690	4.760
25.00	4.960	4.780	4.820	4.920
50.00	5.420	5.130	5.190	5.410
100.00	5.870	5.460	5.550	5.900
200.00	6.310	5.770	5.890	6.380
500.00	6.890	6.160	6.330	7.020

## Anexo D

**Tabla D6 Descargas mínimas de 7 días**

Return Period Frequency Analysis: 7 Day Low Flow Summary

Station: Hydrograph 530

Month (1)	Year (2)	Discharge (3) (cms)	Ordered (4) (cms)	Rank (5)	Prob. (6) (%)	Ret. Period (7) (Years)
3	1956	0.260	0.259	1	1.22	81.667
2	1957	0.259	0.259	2	3.27	30.625
2	1958	0.259	0.259	3	5.31	18.846
2	1959	0.259	0.259	4	7.35	13.611
3	1960	0.259	0.259	5	9.39	10.652
3	1961	0.259	0.259	6	11.43	8.750
2	1962	0.259	0.259	7	13.47	7.424
2	1963	0.259	0.259	8	15.51	6.447
2	1964	0.259	0.259	9	17.55	5.698
3	1965	0.259	0.259	10	19.59	5.104
2	1966	0.259	0.259	11	21.63	4.623
2	1967	0.260	0.259	12	23.67	4.224
2	1968	0.259	0.259	13	25.71	3.889
3	1969	0.259	0.259	14	27.76	3.603
3	1970	0.259	0.259	15	29.80	3.356
2	1971	0.259	0.259	16	31.84	3.141
2	1972	0.259	0.259	17	33.88	2.952
2	1973	0.259	0.259	18	35.92	2.784
3	1974	0.259	0.259	19	37.96	2.634
3	1975	0.259	0.259	20	40.00	2.500
2	1976	0.259	0.259	21	42.04	2.379
2	1977	0.259	0.259	22	44.08	2.269
2	1978	0.259	0.259	23	46.12	2.168
3	1979	0.259	0.259	24	48.16	2.076
2	1980	0.259	0.259	25	50.20	1.992
6	1981	0.264	0.259	26	52.24	1.914
2	1982	0.259	0.259	27	54.29	1.842
2	1983	0.266	0.259	28	56.33	1.775
9	1984	0.262	0.259	29	58.37	1.713
2	1985	0.259	0.259	30	60.41	1.655
2	1986	0.259	0.259	31	62.45	1.601
2	1987	0.259	0.259	32	64.49	1.551
3	1988	0.259	0.259	33	66.53	1.503
2	1989	0.259	0.259	34	68.57	1.458
2	1990	0.259	0.259	35	70.61	1.416
7	1991	0.261	0.259	36	72.65	1.376
3	1992	0.259	0.259	37	74.69	1.339
3	1993	0.259	0.259	38	76.73	1.303
3	1994	0.260	0.259	39	78.78	1.269
2	1995	0.259	0.259	40	80.82	1.237
2	1996	0.259	0.260	41	82.86	1.207

Dataset shows significant skew

**Tabla D7 Análisis de frecuencia de las descargas mínimas**

Low Flow Frequency Analysis

Station: Hydrograph 530

7 Day

Sample Statistics

	Mean	Std.	Skew	Kurt
X Series	0.259	0.001	3.503	16.501
LN X Series	-1.349	0.005	3.485	16.345

X(MIN)= 0.259      Sample Size= 49  
 X(MAX)= 0.266

Drought Frequency Regime

Return Period	LN Drought	Normal Drought
1.25	0.260	0.260
2.00	0.260	0.260
5.00	0.260	0.260
10.00	0.260	0.260
20.00	0.260	0.260
25.00	0.260	0.260
50.00	0.260	0.260
100.00	0.260	0.260
200.00	0.260	0.260
500.00	0.260	0.260

Extreme Flows Summary

Return Period (Years)	High Flows (m <sup>3</sup> /s)	Low Flows (m <sup>3</sup> /s)
1.25	2.350	0.2600
2.00	3.030	0.2600
5.00	3.810	0.2600
10.00	4.260	0.2600
20.00	4.660	0.2600
25.00	4.780	0.2600
50.00	5.130	0.2600
100.00	5.460	0.2600
200.00	5.770	0.2600
500.00	6.160	0.2600

**Tabla D8 Resumen de la duración de los caudales**

Flow-Duration Summary

PCT% Time	Flow (m <sup>3</sup> /s)	PCT% Time	Flow (m <sup>3</sup> /s)
100.0	0.259	50.0	0.278
90.0	0.264	40.0	0.282
80.0	0.267	30.0	0.287
70.0	0.268	20.0	0.300
60.0	0.272	10.0	0.344



**Anexo E**

**Ejemplo de Modelamiento del  
Balance de Aguas de todo el sitio  
y de la Calidad de las Aguas  
para el Proyecto Alto Chicama  
usando GOLDSIM**





Sección .....	Página
<b>A1. Modelo de Manejo de Aguas .....</b>	<b>120</b>
<b>A2. Modelo de calidad de aguas.....</b>	<b>137</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla E1	Resumen de Transferencia Intercuenca de Áreas de Drenaje Asociadas con el Desagüe del Tajo Durante la Vida de la Mina Alto Chicama .....	122
Tabla E2	Resumen de Cambios de Áreas de Drenaje , Alto Chicama .....	123
Tabla E3	Resumen de Simulación de Cambios de Flujo Promedio Anual, Alto Chicama .....	124
Tabla E4	Resumen de la Simulación de Cambios de Flujo en el Mes Húmedo (Febrero), Alto Chicama.....	125
Tabla E5	Resumen de la Simulación de los Cambios de Flujo en el Mes Seco (Julio), Alto Chicama .....	126
Tabla E6	Resumen de los Cambios de Flujo Base Estimados debido al Desagüe del Tajo, Alto Chicama.....	127

## LISTA DE FIGURAS

Figura E1	Esquema simplificado del balance de agua de todo el sitio para el proyecto Alto Chicama .....	119
Figura E2	Esquema del modelo de balance de agua y de calidad de aguas de todo el sitio y regional para el proyecto Alto Chicama .....	120
Figura E3	Flujo Promedio Anual en la desembocadura de la Quebrada Laguna Negra .....	128
Figura E4	Flujo Promedio Anual en la Desembocadura de Río Negro .....	129
Figura E5	Flujo en la Época Seca (Flujo Promedio Mensual en Julio) .....	130
Figura E6	Flujo de la Época Seca (Flujo Promedio Mensual en Julio).....	131
Figura E7	Flujo Promedio Mensual Simulado Durante la Vida del Proyecto Alto Chicama (2006-2008) .....	132
Figura E8	Esquema del modelo de mezcla para la predicción de calidad de aguas en Alto Chicama .....	138
Figura E9	Plano de distribución de las instalaciones del proyecto Alto Chicama utilizado para la elaboración del modelo de balance de aguas y calidad de aguas.....	138

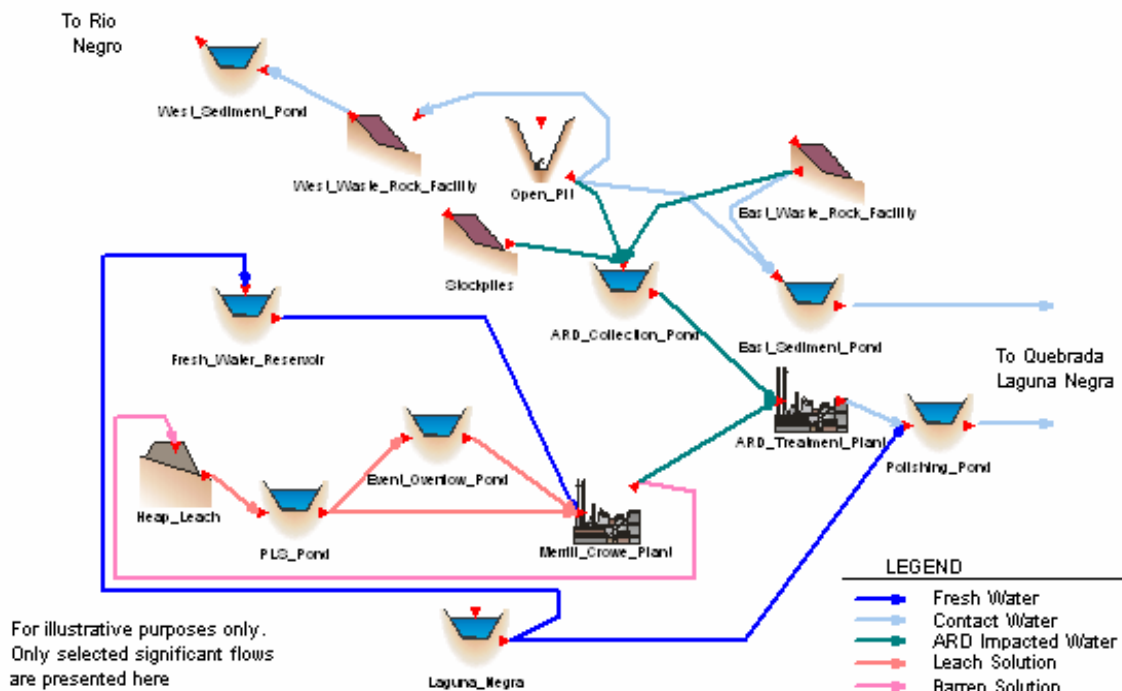


## Anexo E

El programa de computador de modelamiento dinámico GOLDSIM ([www.goldsim.com](http://www.goldsim.com)) es una herramienta útil para monitorear todos los componentes del balance hídrico y calidad de aguas de un proyecto u operación. Originalmente desarrollado por Golder Associates como un programa global de modelamiento para la evaluación del desempeño de depósitos de residuos radiactivo de alto nivel, GOLDSIM ha sido utilizado intensivamente en este sentido durante los últimos ocho años en los Estados Unidos (principalmente en los proyectos de depósitos Yucca Mountain y WIPP), Japón, España y muchos otros países. Más recientemente, se ha utilizado GOLDSIM para abordar un rango más amplio de problemas ambientales no nucleares, incluyendo el abandono final de sitios mineros y la evaluación del riesgo ambiental. En el Perú, GOLDSIM ha sido utilizado en el estudio de manejo de aguas del proyecto Alto Chicama. GOLDSIM se puede aplicar tanto en modos determinísticos como estocásticos para analizar los potenciales impactos de las diversas condiciones de diseño.

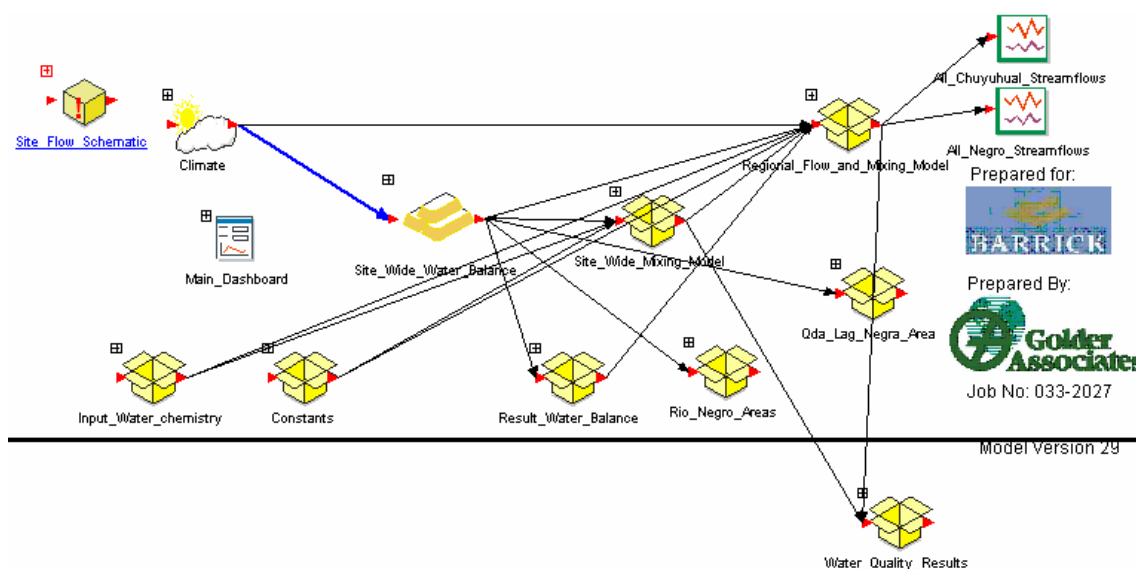
GOLDSIM es una hoja de cálculo visual que permite organizar fácilmente los modelos. En la Figura E1 se muestra el esquema del balance de agua y modelo de calidad de agua preparado para el EIA de Alto Chicama.

**Figura E1 Esquema simplificado del balance de agua de todo el sitio para el proyecto Alto Chicama**



Los elementos gráficos permiten organizar el modelo de manera muy sencilla. Cada elemento guarda los cálculos de flujo y calidad.

**Figura E2 Esquema del modelo de balance de agua y de calidad de aguas de todo el sitio y regional para el proyecto Alto Chicama**



En las siguientes secciones se muestra la aplicación de la simulación con GOLDSIM para el manejo de aguas del proyecto Alto Chicama y para la predicción de los impactos en la calidad del agua.

## A1. MODELO DE MANEJO DE AGUAS

Las Figuras E1 y E2 muestran el esquema adoptado para el modelamiento de balance de aguas del proyecto Alto Chicama.

Los datos clave para el modelo de manejo de aguas de Alto Chicama incluyeron:

- Las lluvias;
- La escorrentía superficial;
- Las pérdidas de agua de las instalaciones del proyecto debido a evaporación y consumo de aguas (e.g., absorción del agua en la roca de desmonte u otro material, entrapamiento de agua en los poros del relave);
- El uso del agua en los procesos de minado para el control del polvo y para el abastecimiento del campamento; y
- El tratamiento y la liberación al ambiente del agua sin contacto (limpia) y del agua de contacto (contaminada).

Los datos para el modelo fueron clasificados como:

- Invariables, como las áreas de drenaje de las cuencas;
- Variables, como la geometría de las instalaciones durante las diferentes fases del proyecto (e.g., incremento de las plataformas de lixiviación o los botaderos de roca de desmonte con el paso del tiempo); e
- Inciertos, como los datos meteorológicos (i.e., precipitación diaria).

Considerando que los datos invariables y variables son sencillos de calcular tomando como base los valores de medición o los diseños de ingeniería, se requiere simular los datos meteorológicos. Esto se efectúa tomando como base el estudio de línea base de hidrología, que emplea los datos disponibles regionales y del área del proyecto sobre la precipitación y la evaporación. Para el proyecto Alto Chicama, se puede calcular la precipitación diaria empleando un modelo de Cadena Markov de segundo orden, que justifica la correlación entre la precipitación en días consecutivos. Se estimó la evaporación para cada uno de los meses del año basada en los mecanismos y las variaciones de los datos de evaporación de bandeja. El modelo desarrollado para Alto Chicama fue capaz de simular eventos únicos de tormenta, fallas de las instalaciones y tiempos de parada programados.

Se empleó el modelo del balance hídrico de toda el área del proyecto para determinar el tamaño de las diversas pozas del proyecto y los requerimientos totales de agua de la planta de procesamiento (demanda de agua de reposición), los flujos entre las pozas y las instalaciones y las cantidades de agua contaminada y tratada.

También se utilizó el modelo para evaluar la calidad del agua en diversos puntos del área del proyecto, de manera que las estrategias de manejo de aguas se pudieran optimizar para las operaciones y el cierre.

Las tablas y los cuadros adjuntos a continuación resumen los resultados de la evaluación del impacto hidrológico. Los datos mostrados se basan tanto en la simulación de GOLDSIM como en el análisis físico de los datos de proyecto. Se empleó el modelo para simular flujos en doce secciones transversales de cursos de agua en dos cuencas hidrográficas.

Las derivaciones de la cuenca de drenaje y el bombeo durante la etapa de operaciones del proyecto se resumen en la Tabla E1. Esta tabla constituye un ejemplo del análisis físico de la evaluación de impacto del flujo. La información sobre las derivaciones de caudal y el bombeo se empleó para la determinación del modelo y para la evaluación de los resultados simulados. Se explicaron los incrementos o las reducciones en el flujo de simulación durante toda la vida útil del proyecto, tomando como base las derivaciones y el bombeo propuestos.

La Tabla E2 muestra los cambios en el área de drenaje en las ubicaciones de interés a lo largo de la vida útil del proyecto, desde las condiciones de línea base (previa al desarrollo) hasta las condiciones post-cierre. Como se puede observar en la Tabla E1, el área de drenaje en la desembocadura de Quebrada Laguna Negra se incrementará en forma gradual de 8,3 km<sup>2</sup> a 9,2 km<sup>2</sup>, en aproximadamente 10%. Estas áreas de drenaje fueron calculadas tomando como base los planes de desarrollo del proyecto.

La Tabla E3 muestra los cambios en el flujo promedio anual. El incremento y la reducción máximos de los flujos relativos al nivel de línea base se incluyen en las fases de Operación, Cierre y Post-Cierre. Como se puede observar en la Tabla E3, el flujo promedio anual en la desembocadura de Quebrada Laguna Negra fluctúa durante la vida útil del proyecto. Eventualmente, se incrementa en 16%, que corresponde al incremento de 10% del área de drenaje.

Se efectuaron comparaciones similares para los caudales de febrero (mes húmedo) en las Tablas E4, julio (mes seco) en la Tabla E5, y el flujo base en la Tabla E6. Los cambios simulados de flujo correspondieron con las expectativas basadas en las derivaciones y los esquemas de bombeo propuestos.

**Tabla E1 Resumen de Transferencia Intercuencia de Áreas de Drenaje Asociadas con el Desagüe del Tajo Durante la Vida de la Mina Alto Chicama**

Fase	Año	Drenaje Natural - Removido de la Cuenca		Desagüe del Tajo - Retorno a la Cuenca				Transferencias Intercuencias				
		Área del Tajo Removida de la Cuenca de Río Perejil	Área del Tajo Removida de la Cuenca del Río Chuyuhual	Área de Taludes del Tajo Derivada a la Poza de Sedimentos Oeste	Área de Taludes del Tajo Derivada a la Poza de Sedimentos Este	Área de Taludes del Tajo Derivada a la Poza Colectora	Drenaje Total	A la Poza de Sedimentación Oeste	A la Poza de Sedimentación Este	Removido del Río Perejil	Removido de la Qda Las Vizcachas	Agregado al Agua de Mina a la Qda. Laguna Negra
		m²	m²	%	%	%	m²	m²	m²	m²	m²	m²
1	2005	0.03	0.05	0%	100%	0%	0.00	0.22	0.03	0.03	0.05	0.08
2	2007	0.14	0.15	5%	95%	0%	0.05	0.89	0.09	0.09	0.15	0.24
3	2009	0.15	0.30	10%	50%	40%	0.12	1.10	0.03	0.03	0.30	0.34
4	2013	0.23	0.40	0%	0%	100%	0.00	1.52	0.23	0.23	0.40	0.64
Cierre												

Nota  
Fuente: Archivo para la Simulación con Goldsim

Tabla E2 Resumen de Cambios de Áreas de Drenaje , Alto Chicama

Estación No.	Cuenca	Condiciones del Caudal	Área de Drenaje de Línea Base			Construcción (2004-2005)			Operación (2006-2013)			Cierre (2014-2018) y Post Cierre (2020)		
			km <sup>2</sup>	Cambio de Área	Porcentaje de Área de Drenaje de Línea Base %	km <sup>2</sup>	Cambio de Área	Porcentaje de Área de Drenaje de Línea Base %	km <sup>2</sup>	Cambio de Área	Porcentaje de Área de Drenaje de Línea Base %	km <sup>2</sup>	Cambio de Área	Porcentaje de Área de Drenaje de Línea Base %
1		Quebrada Laguna Negra en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	8.3	0.0	100%	8.9	0.60	107%	9.2	0.85	110%			
2		Quebrada Quishuara Sur en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	1.3	0.0	100%	0.7	-0.65	50%	0.7	-0.65	50%			
3		Quebrada Quishuara Norte en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	3.1	0.0	100%	3.0	-0.10	97%	3.0	-0.10	97%			
4		Quebrada Las Vizcachas en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	9.7	0.0	100%	9.3	-0.44	95%	9.7	-0.05	99%			
5	Río Chuyuhual	Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con Quebrada Quishuara Norte	29	0.0	100%	28.4	-1.0	97%	29.4	0.05	100%			
6		Río Chuyuhual aguas arriba de la confluencia con Quebrada Las Vizcachas	33	0.0	100%	32.0	-1.0	97%	33.1	0.05	100%			
7		Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con la Quebrada Las Vizcachas	43	0.0	100%	42.0	-1.0	98%	43.1	0.05	100%			
8		Río Chuyuhual en Sanagorán	279	0.0	100%	278	-1.0	100%	279	0.05	100%			
9		Río Negro en la desembocadura propuesta en la Poza de Sedimentos Oeste	3.4	0.0	100%	3.2	-0.2	94%	3.4	-0.05	99%			
10	Río Negro	Río Negro en su desembocadura (confluencia con Río Perejil)	9.8	0.0	100%	9.6	-0.2	98%	9.8	-0.05	99%			
11		Río Perejil en el Límite del Área de Estudio Local (La Victoria)	36	0.0	100%	35.5	-0.2	99%	35.7	-0.05	100%			
12		Río Alto Chicama en Coina en el Límite del Área de Estudio Regional	203	0.0	100%	203	-0.2	100%	203	-0.05	100%			

Tabla E3 Resumen de Simulación de Cambios de Flujo Promedio Anual, Alto Chicama

Estación No.	Cuenca	Condiciones de Caudal	Flujo Promedio Anual Simulado m <sup>3</sup> /s	Operación (2006-2013)				Cierre (2014-2018)				Post Cierre (2020)						
				Incremento del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base		Reducción del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base		Incremento del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base		Reducción del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base		Incremento del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base		Reducción del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base				
				Flujo m <sup>3</sup> /s	Cambio de Flujo m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de Flujo de Línea Base %	Flujo m <sup>3</sup> /s	Cambio de Flujo m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de Flujo de Línea Base %	Flujo m <sup>3</sup> /s	Cambio de Flujo m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de Flujo de Línea Base %	Flujo m <sup>3</sup> /s	Cambio de Flujo m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de Flujo de Línea Base %	Flujo m <sup>3</sup> /s	Cambio de Flujo m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de Flujo de Línea Base %
1	Río Chuyuhual	Quebrada Laguna Negra en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.21	0.22	0.01	105%	0.20	-0.01	96%	0.26	0.04	121%	0.23	NA	NA	0.25	0.03	116%
2		Quebrada Quishuara Sur en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.03	0.02	NA	NA	0.02	-0.02	46%	0.02	NA	NA	0.02	-0.01	55%	0.02	-0.01	61%
3		Quebrada Quishuara Norte en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.08	0.08	0.00	103%	0.08	NA	NA	0.08	0.00	105%	0.08	NA	NA	0.08	0.00	104%
4		Quebrada Las Vizcachas en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.25	0.26	0.01	103%	0.25	0.00	99%	0.25	0.00	100%	0.25	NA	NA	0.25	0.00	100%
5		Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con Quebrada Quishuara Norte	0.75	0.77	0.01	102%	0.74	-0.01	99%	0.81	0.05	107%	0.78	NA	NA	0.79	0.04	105%
6		Río Chuyuhual aguas arriba de la confluencia con Quebrada Las Vizcachas	0.84	0.86	0.02	102%	0.84	NA	NA	0.90	0.06	107%	0.87	NA	NA	0.89	0.04	105%
7		Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con la Quebrada Las Vizcachas	1.09	1.12	0.03	102%	1.09	NA	NA	1.15	0.06	105%	1.12	NA	NA	1.13	0.04	104%
8		Río Chuyuhual en Sanagorán	7.12	7.38	0.26	104%	7.33	NA	NA	7.42	0.29	104%	7.38	NA	NA	7.37	0.25	104%
9		Río Negro en la desembocadura propuesta en la Poza de Sedimentos Oeste	0.09	0.08	NA	NA	0.07	-0.01	84%	0.09	NA	NA	0.09	NA	NA	0.09	0.00	104%
10		Río Negro en su desembocadura (confluencia con Río Perejil)	0.25	0.25	0.00	102%	0.24	-0.01	97%	0.26	0.01	104%	0.26	NA	NA	0.26	0.01	104%
11		Río Perejil en el Límite del Área de Estudio Local (La Vactoria)	0.91	0.94	0.03	103%	0.93	NA	NA	0.95	0.04	104%	0.94	NA	NA	0.94	0.03	103%
12		Río Alto Chicama en Coira en el Límite del Área de Estudio Regional	5.19	5.39	0.20	104%	5.35	NA	NA	5.39	0.20	104%	5.37	NA	NA	5.37	0.18	103%

Notas:

Fuente de Datos:  
 NA - no aplica, indica que el incremento (o disminución) del flujo no ocurrió durante la etapa del proyecto  
 Durante la Etapa de Construcción no se simularon los flujos en el modelo de balance de agua. En el texto se presenta la discusión de las condiciones de flujo al momento de la Etapa de Construcción. Se demuestran que no se presentarán cambios significativos en la cuenca durante la construcción.



Tabla E4 Resumen de la Simulación de Cambios de Flujo en el Mes Húmedo (Febrero), Alto Chicama

Estación No.	Cuenca	Condiciones de Caudal	Flujo Promedio Mensual Simulado (Febrero) m <sup>3</sup> /s	Operación (2006-2013)				Cierre (2014-2018)				Post Cierre (2020)					
				Incremento del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base		Reducción del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base		Incremento del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base		Reducción del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base		Cambio respecto al Flujo de Línea Base		Cambio respecto al Flujo de Línea Base			
				Flujo m <sup>3</sup> /s	Cambio de Flujo m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de Flujo de Línea Base %	Flujo m <sup>3</sup> /s	Cambio de Flujo m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de Flujo de Línea Base %	Flujo m <sup>3</sup> /s	Cambio de Flujo m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de Flujo de Línea Base %	Flujo m <sup>3</sup> /s	Cambio de Flujo m <sup>3</sup> /s	Porcentaje de Flujo de Línea Base %		
1	Río Chuyuhual	Quebrada Laguna Negra en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.36	0.00	100%	0.33	-0.03	93%	0.46	0.10	129%	0.37	0.01	103%	0.42	0.06	118%
2		Quebrada Quishuara Sur en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.06	NA	NA	0.02	-0.03	44%	0.04	NA	NA	0.03	NA	NA	0.04	-0.02	71%
3		Quebrada Quishuara Norte en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.13	0.00	100%	0.13	NA	NA	0.14	0.00	102%	0.13	NA	NA	0.14	0.00	102%
4		Quebrada Las Vizcachas en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.42	NA	NA	0.40	-0.02	95%	0.40	NA	NA	0.40	NA	NA	0.40	-0.01	97%
5		Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con Quebrada Quishuara Norte	1.27	1.24	NA	1.20	-0.07	95%	1.36	0.09	107%	1.25	-0.02	98%	1.32	0.05	104%
6		Río Chuyuhual aguas arriba de la confluencia con Quebrada Las Vizcachas	1.43	1.40	-0.03	1.36	-0.07	95%	1.52	0.09	106%	1.40	-0.02	98%	1.48	0.05	104%
7		Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con la Quebrada Las Vizcachas	1.85	1.80	NA	1.76	-0.09	95%	1.92	0.08	104%	1.80	NA	NA	1.88	0.04	102%
8		Río Chuyuhual en Sanagorán	12.05	12.00	-0.05	11.84	-0.21	98%	12.12	0.08	101%	11.88	NA	NA	12.08	0.04	100%
9		Río Negro en la desembocadura propuesta en la Poza de Sedimentos Oeste	0.15	0.14	0.00	0.11	-0.04	75%	0.15	0.00	101%	0.14	NA	NA	0.15	0.00	102%
10		Río Negro en su desembocadura (confluencia con Río Peréjil)	0.42	0.41	0.00	0.38	-0.04	91%	0.43	0.00	100%	0.42	NA	NA	0.43	0.00	101%
11		Río Peréjil en el Límite del Área de Estudio Local (La Victoria)	1.54	1.53	-0.02	1.49	-0.05	97%	1.54	0.00	100%	1.52	NA	NA	1.55	0.00	100%
12		Río Alto Chicama en Coína en el Límite del Área de Estudio Regional	8.77	8.76	-0.02	8.63	-0.14	98%	8.78	0.00	100%	8.67	NA	NA	8.78	0.00	100%

Notas:

Durante la Etapa de Construcción no se simularon los flujos en el modelo de balance de agua. En el texto se presenta la discusión de las condiciones de flujo al momento de la Etapa de Construcción. Se demuestran que no se presentarán cambios significativos en la cuenca durante la construcción.

NA - no aplica, indica que el incremento (o disminución) del flujo no ocurrió durante la etapa del proyecto

Tabla E5 Resumen de la Simulación de los Cambios de Flujo en el Mes Seco (Julio), Alto Chicama

Estación No.	Cuenca	Condiciones de Caudal	Flujo Mensual Promedio para la Línea Base (Julio)		Operación (2006-2013)			Cierre (2014-2018)			Post Cierre (2020)					
			Incremento del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base	Disminución del Flujo Máx respecto al Flujo de Línea Base	Flujo	Cambio en el Flujo	Porcentaje del Flujo de Línea Base	Flujo	Cambio en el Flujo	Porcentaje del Flujo de Línea Base	Flujo	Cambio en el Flujo	Porcentaje del Flujo de Línea Base			
1		Quebrada Laguna Negra en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.05	0.008	115%	0.04	NA	82%	0.07	0.025	149%	0.05	NA	0.08	0.026	153%
2		Quebrada Quishuara Sur en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.01	NA	NA	0.00	-0.004	45%	0.00	NA	NA	0.00	-0.004	0.00	-0.004	45%
3		Quebrada Quishuara Norte en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.02	NA	101%	0.02	0.000	100%	0.02	NA	NA	0.02	NA	0.02	0.000	100%
4	Río Chuyuhual	Quebrada Las Vizcachas en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	0.06	NA	NA	0.06	-0.002	96%	0.06	NA	NA	0.06	-0.002	0.06	-0.002	96%
5		Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con Quebrada Quishuara Norte	0.18	0.008	104%	0.17	-0.008	95%	0.20	0.024	114%	0.17	-0.002	0.20	0.023	113%
6		Río Chuyuhual aguas arriba de la confluencia con Quebrada Las Vizcachas	0.20	0.008	104%	0.19	-0.008	96%	0.22	0.024	112%	0.20	-0.002	0.22	0.023	112%
7		Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con la Quebrada Las Vizcachas	0.26	0.009	104%	0.25	-0.009	96%	0.28	0.023	108%	0.25	-0.003	0.28	0.021	108%
8		Río Chuyuhual en Sanagorán	1.67	0.036	102%	1.66	-0.006	100%	1.72	0.050	103%	1.68	0.013	1.69	0.021	101%
9		Río Negro en la desembocadura propiamente en la Poza de Sedimentos Oeste	0.02	NA	NA	0.01	-0.008	62%	0.02	NA	NA	0.02	-0.001	0.02	0.002	108%
10	Río Negro	Río Negro en su desembocadura (confluencia con Río Peréjil)	0.06	NA	NA	0.05	-0.008	87%	0.06	NA	NA	0.06	0.000	0.06	0.002	103%
11		Río Peréjil en el Límite del Área de Estudio Local (La Vactoria)	0.21	0.002	101%	0.21	-0.008	96%	0.22	0.006	103%	0.21	0.001	0.22	0.002	101%
12		Río Alto Chicama en Coima en el Límite del Área de Estudio Regional	1.21	0.021	102%	1.21	-0.008	99%	1.24	0.024	102%	1.21	0.001	1.21	0.002	100%

Notas:

NA - no aplica, indica que el incremento (o disminución) del flujo no ocurrió durante la etapa del proyecto. Durante la Etapa de Construcción no se simuló los flujos en el modelo de balance de agua. En el texto se presenta la discusión de las condiciones de flujo al momento de la Etapa de Construcción. Se demuestran cambios significativos en la cuenca durante la construcción.

## Anexo E

**Tabla E6 Resumen de los Cambios de Flujo Base Estimados debido al Desagüe del Tajo, Alto Chicama**

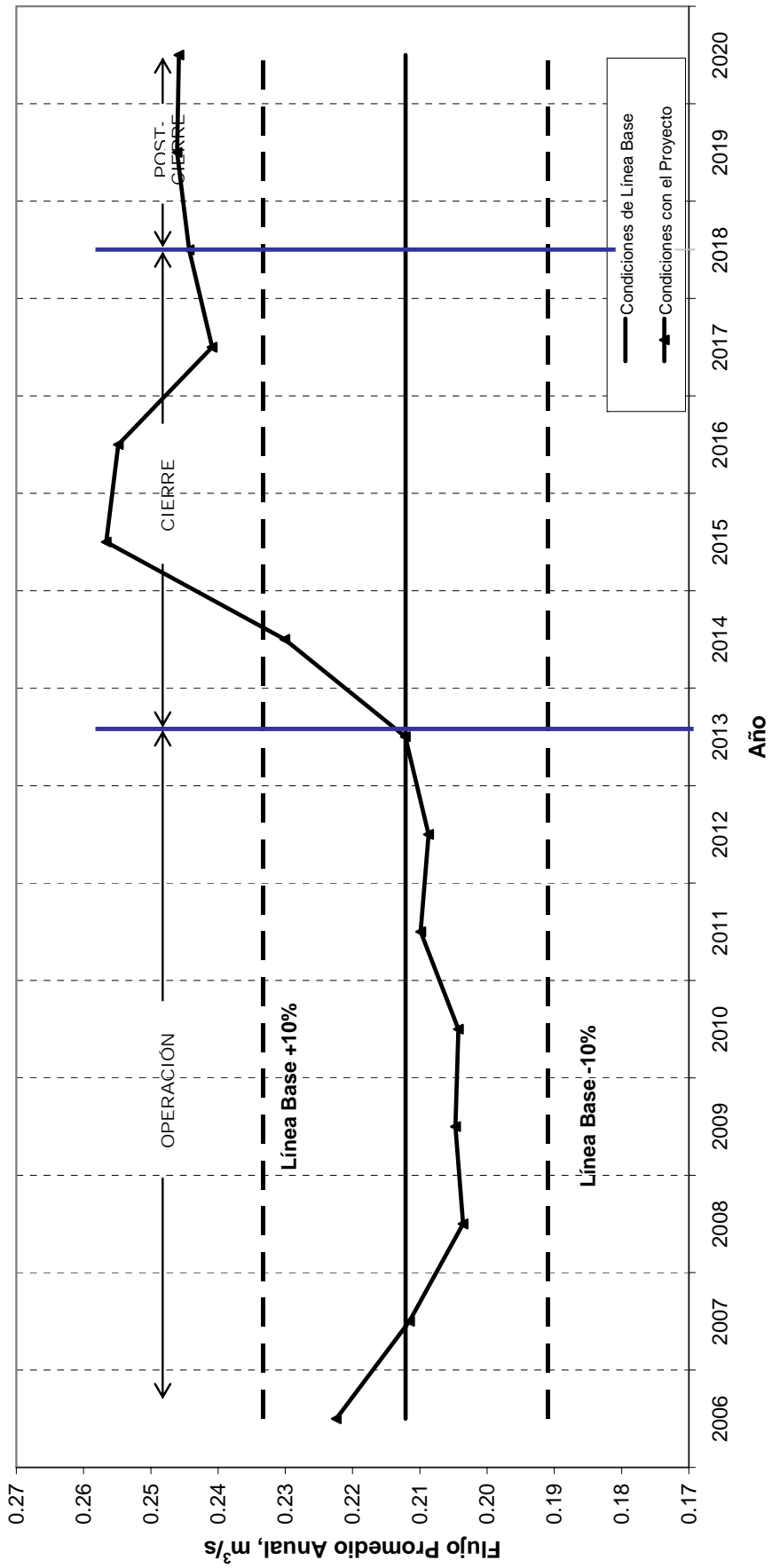
Estación No.	Cuenca	Condiciones del Caudal	Línea Base	Cierre (2014-2018) y Post Cierre (2020)		
			Flujo Base Estimado	Flujo Base Estimado	Incremento del Flujo Base respecto a las condiciones de Línea Base	Porcentaje del Flujo Base respecto al de las condiciones de Línea Base
			L/s	L/s	L/s	%
1	Río Chuyuhual	Quebrada Laguna Negra en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	17	52	35.4	313%
2		Quebrada Quishuara Sur en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	2.6	NA	NA	NA
3		Quebrada Quishuara Norte en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	6.2	NA	NA	NA
4		Quebrada Las Vizcachas en su desembocadura (confluencia con el Río Chuyuhual)	19	20	0.1	101%
5		Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con Quebrada Quishuara Norte	59	94	35.4	160%
6		Río Chuyuhual aguas arriba de la confluencia con Quebrada Las Vizcachas	66	101	35.4	154%
7		Río Chuyuhual aguas abajo de la confluencia con la Quebrada Las Vizcachas	86	121	35.4	141%
8		Río Chuyuhual en Sanagorán	558	593	35.4	106%
9	Río Negro	Río Negro en la desembocadura propuesta en la Poza de Sedimentos Oeste	6.8	11	3.9	157%
10		Río Negro en su desembocadura (confluencia con Río Perejil)	20	24	3.9	120%
11		Río Perejil en el Límite del Área de Estudio Local (La Vóctoria)	71	75	3.9	105%
12		Río Alto Chicama en Coina en el Límite del Área de Estudio Regional	406	410	3.9	101%

**Notas**

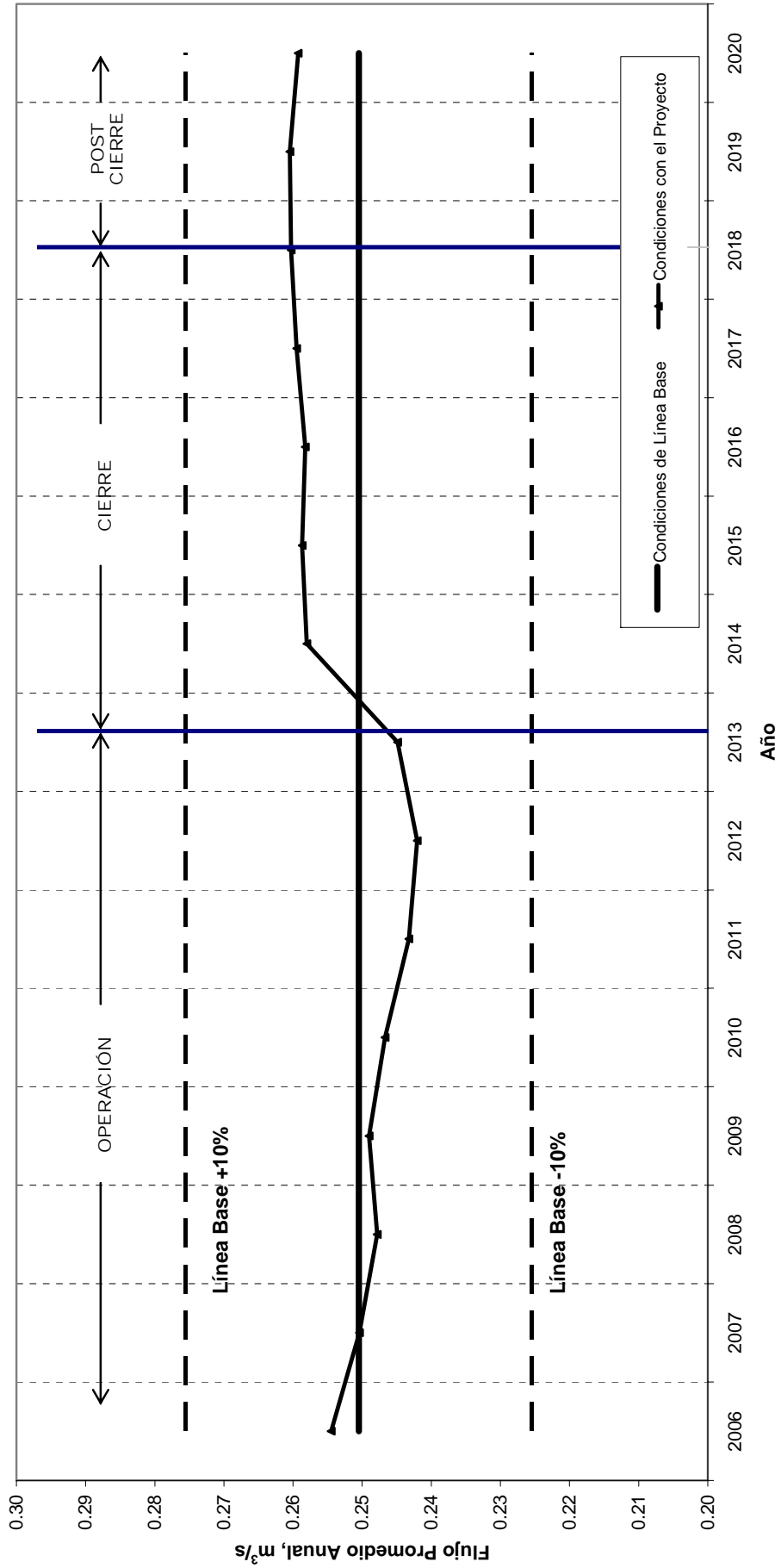
NA - el proyecto no afectará las condiciones de flujo del agua subterránea. No se han realizado estudios hidrogeológicos. Se dedujeron cambios del flujo base en el Informe de Línea Base de Hidrogeología del Proyecto Alto Chicama (Golder 2003d)

Los resultados simulados se presentan gráficamente para la evaluación visual. En las Figuras E3 y E4, se comparan los caudales anuales promedio simulados a lo largo de la vida útil del proyecto con las condiciones de línea base de para dos quebradas. Las Figuras E5 y E6 muestran una evaluación similar para los flujos de la época seca. Los límites de 10% por encima y por debajo del flujo de línea base ayudan a visualizar la importancia del informe de impacto ambiental. En la Figura E7, se compara los flujos mensuales simulados con los flujos mensuales de línea base para todo el ciclo de vida del proyecto.

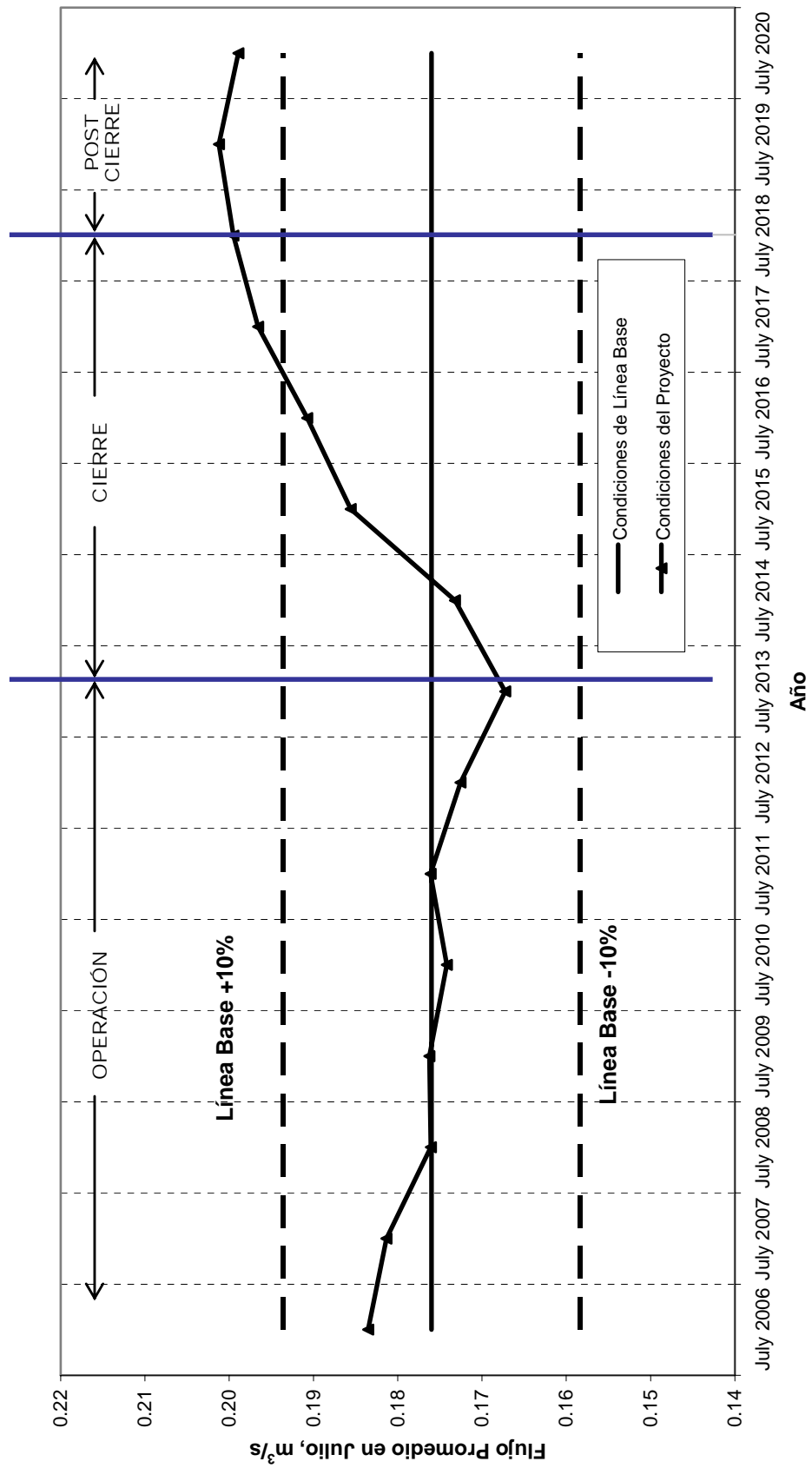
**Figura E3 Flujo Promedio Anual en la desembocadura de la Quebrada Laguna Negra**  
 (Confluencia con Río Chuyuhual) durante la Vida del Proyecto Alto Chicama - Área de Drenaje = 8.3 km<sup>2</sup>



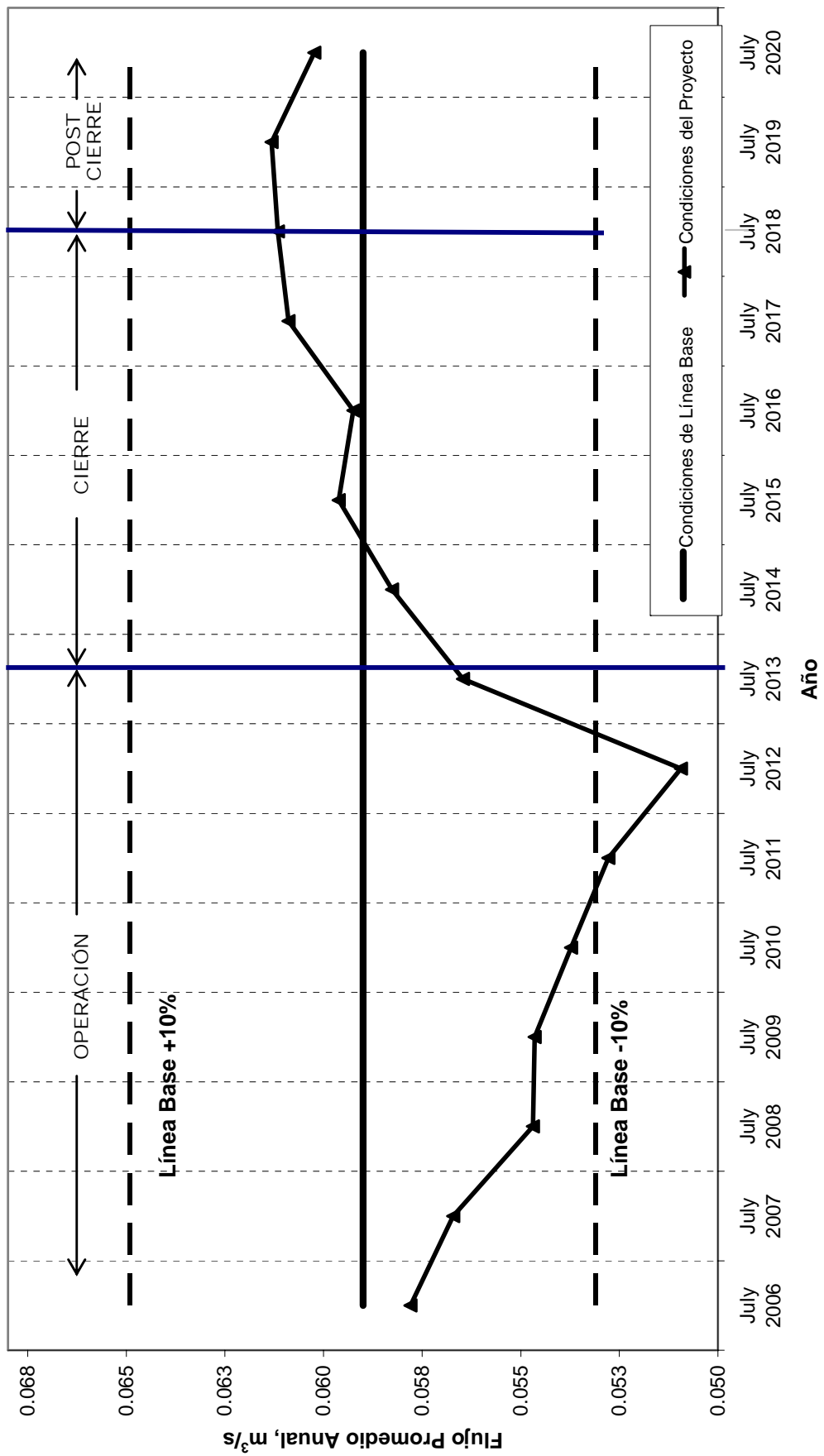
**Figura E4 Flujo Promedio Anual en la Desembocadura de Río Negro**  
 (Confluencia con Río Perejil) durante la Vida del Proyecto Alto Chicama  
 Área de Drenaje = 9.8 km<sup>2</sup>



**Figura E5 Flujo en la Época Seca (Flujo Promedio Mensual en Julio)**  
 Durante la Vida del Proyecto Alto Chicama Río Chuyuhual aguas abajo de la Confluencia con la Quebrada Quishuara Norte -  
 Área de Drenaje = 29 km<sup>2</sup>



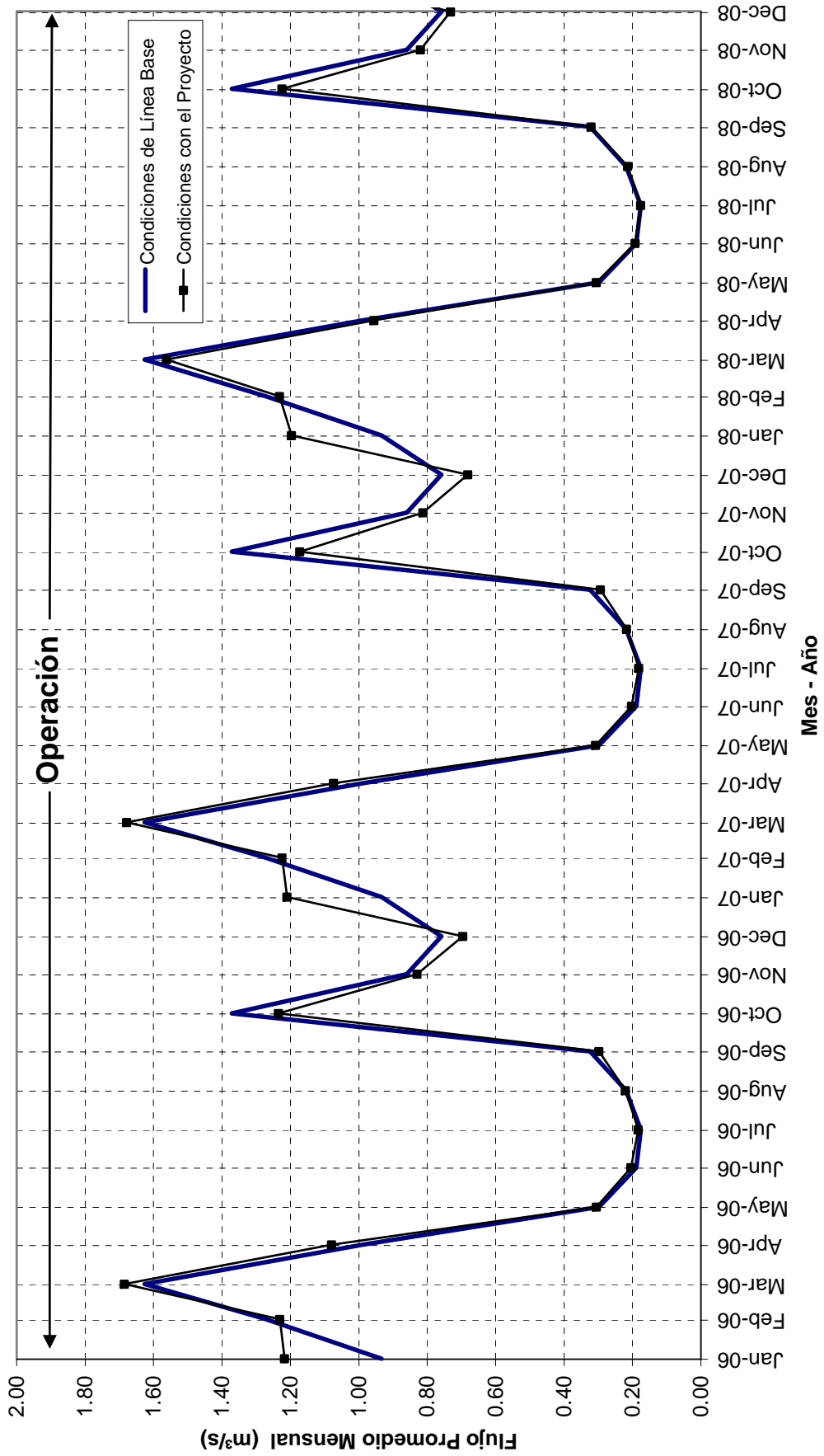
**Figura E6 Flujo de la Época Seca (Flujo Promedio Mensual en Julio)**  
 Durante la Vida del Proyecto Alto Chicama Río Negro en su Desembocadura  
 (Confluencia con el Río Perejil)  
 Área de Drenaje = 9.8 km<sup>2</sup>



**Figura E7 Flujo Promedio Mensual Simulado Durante la Vida del Proyecto Alto Chicama**

Río Chuyuhual, Aguas Abajo de la Confluencia con la Quebrada Quishuara Norte

Área de Drenaje = 29 km<sup>2</sup>

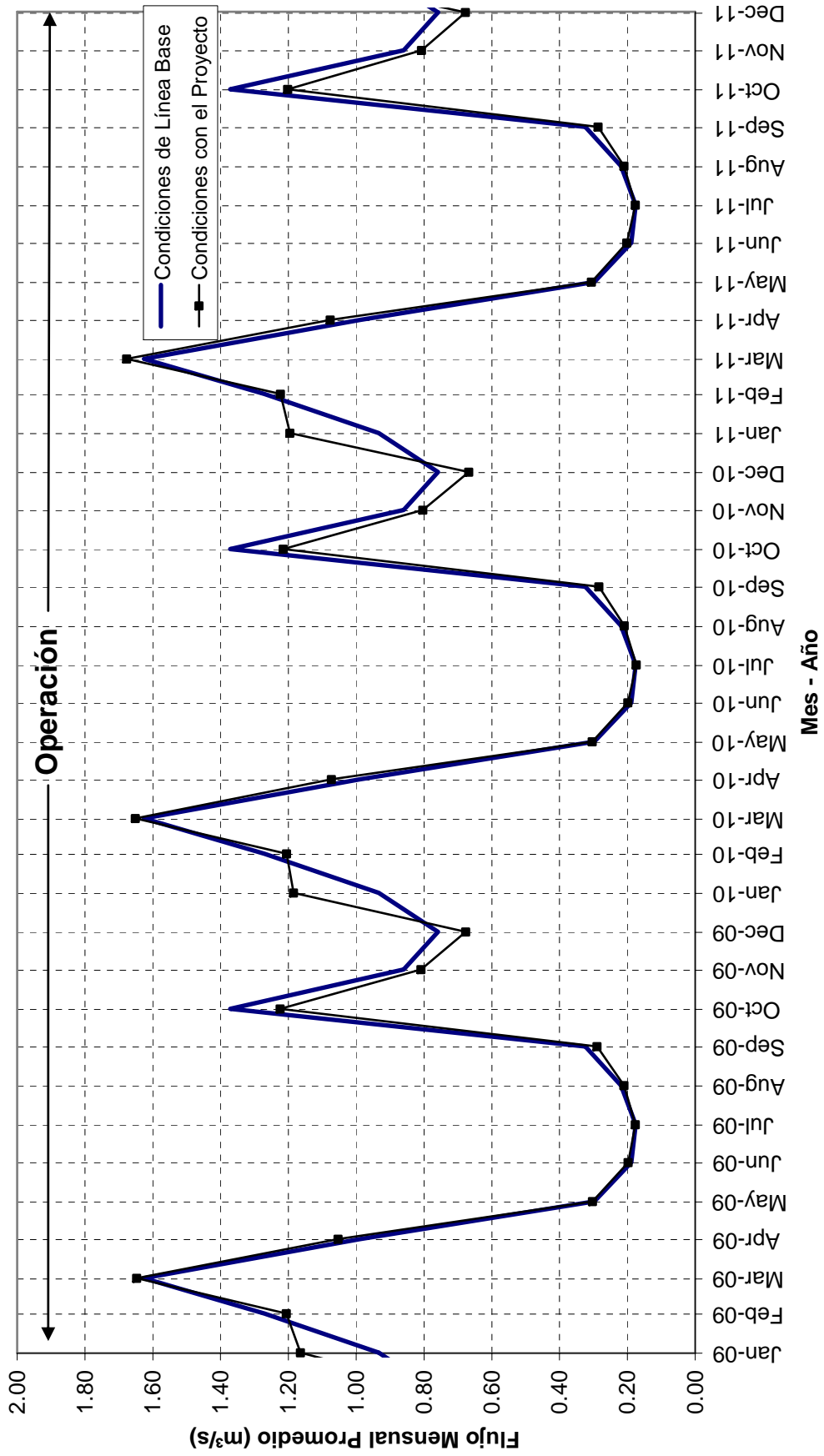




**Figura E7 Flujo Promedio Mensual Simulado Durante la Vida del Proyecto Alto Chicama**

Río Chuyuhual, Aguas Abajo de la Confluencia con la Quebrada Quishuara Norte

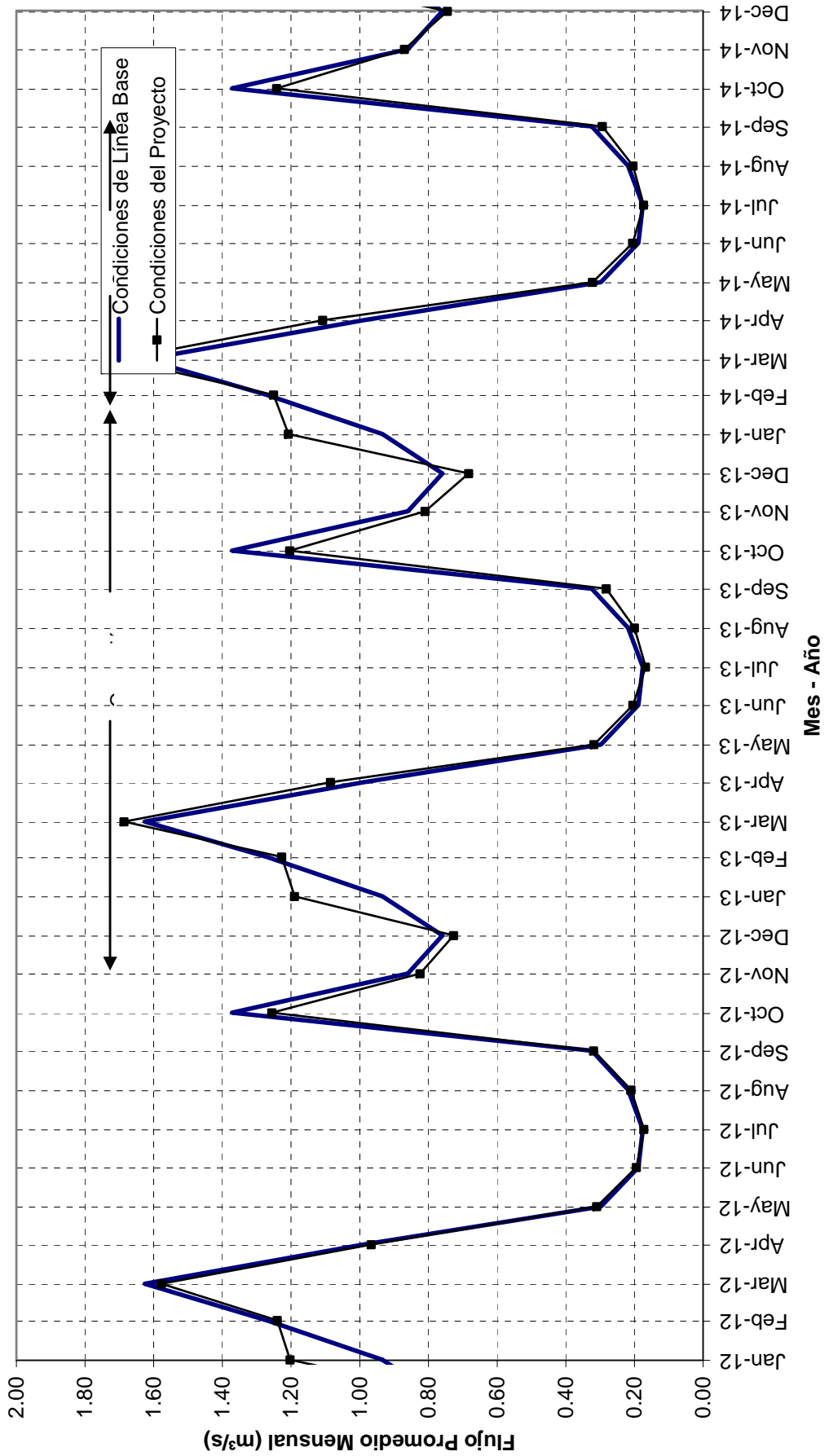
Área de Drenaje = 29 km<sup>2</sup>



**Figura E7 Flujo Promedio Mensual Simulado durante la Vida del Proyecto Alto Chicama**

Río Chuyuhual, aguas abajo de la Confluencia con la Quebrada Quishuara Norte

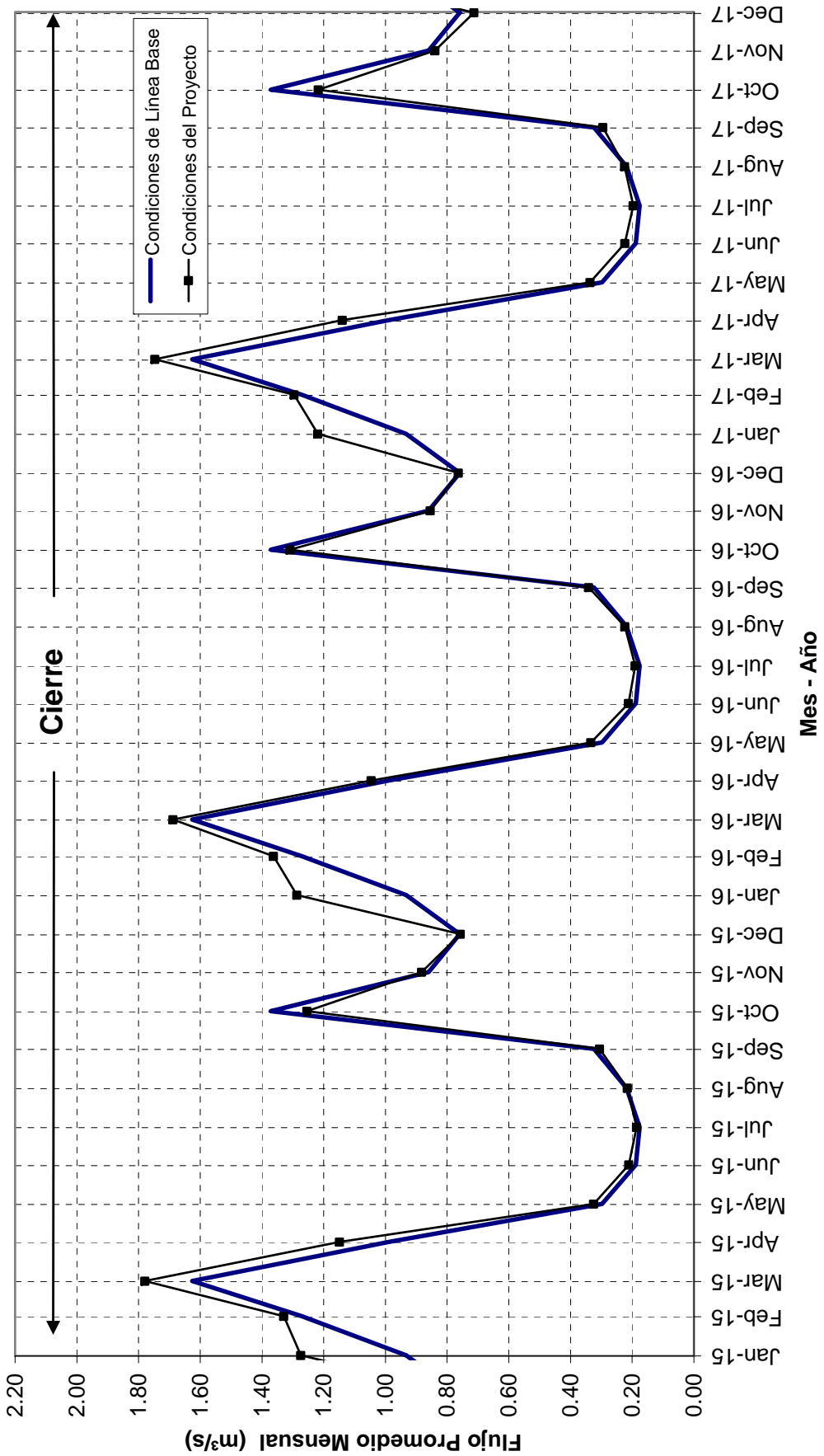
Área de Drenaje = 29 km<sup>2</sup>



**Figura E7 Flujo Promedio Mensual Simulado Durante la Vida del Proyecto Alto Chicama**

Río Chuyuhual, aguas abajo de la Confluencia con la Quebrada Quishuara Norte

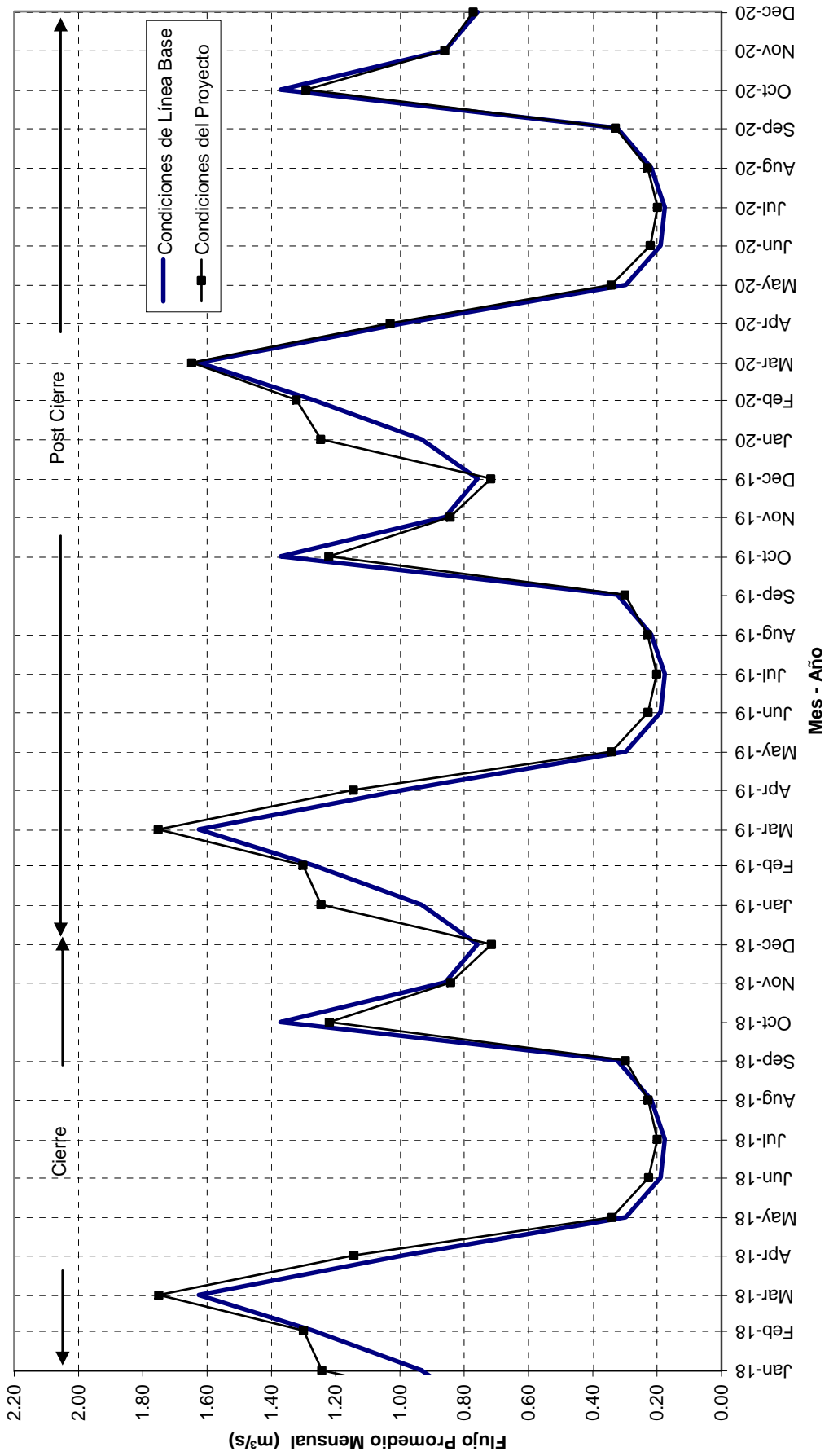
Área de Drenaje = 29 km<sup>2</sup>



**Figura E7 Flujo Promedio Mensual Simulado Durante la Vida del Proyecto Alto Chicama**

Río Chuyuhual, aguas abajo de la Confluencia con la Quebrada Quishuara Norte

Área de Drenaje = 29 km<sup>2</sup>



### A2. MODELO DE CALIDAD DE AGUAS

Para el modelamiento de la calidad del agua se eligió un modelo de mezcla simple, en el cual se evalúan las concentraciones promedio de los parámetros asumiendo que los diferentes componentes del sistema sufren una mezcla perfecta y se pueden despreciar los fenómenos de decaimiento de los contaminantes, así como la dispersión de los contaminantes.

La Figura E- 8 muestra el esquema adoptado para el modelamiento del balance de agua y la calidad de las aguas. Como se puede ver, el modelo considera el clima, los flujos regionales, calidades de los cursos de agua y el balance de las instalaciones, para calcular las descargas a cada una de las cuencas.

El modelo de mezcla del sitio considera el manejo de agua de las instalaciones. Este modelo está de acuerdo al funcionamiento propuesto de cada instalación. En la Figura E-9 se muestra la distribución de las instalaciones. Se puede apreciar fácilmente la correspondencia entre los diferentes elementos

En el caso de la Poza de Limpieza, el modelo de mezcla considera los flujos y las cargas de cada entrada a la poza, tal como se muestra en la Figura E-10. Los resultados utilizando un balance de masa son el flujo y la calidad de agua.

Los resultados del modelo son presentados en forma gráfica para mostrar las concentraciones a lo largo de los años (Figura E-11).

Asimismo, se puede colocar los valores por parámetros para cada poza. La Figura E-12 muestra los flujos de la poza de sedimentación este y la poza de limpieza a lo largo de los años.

Un ejemplo es el cálculo de las concentraciones de sulfato, tal como se muestra en la Figura E-13.

Esta figura pone de manifiesto los diferentes efectos que se suceden por la operación de las instalaciones y las diferentes fases del proyecto. Mientras que la concentración de sulfatos en la poza de sedimentación se mantiene estable, la poza de limpieza muestra una clara tendencia al incremento.

La poza de limpieza recibe las descargas de la planta de tratamiento de destrucción de cianuro y de neutralización, ambas producen sulfato. El tratamiento es necesario sólo durante etapas con excesos de agua, por lo que varía periódicamente a lo largo de un año. El incremento brusco se debe a la fase de cierre, donde se produce un mayor tratamiento de la solución cianurada que queda en el pad de lixiviación. Luego de la etapa de cierre, la concentración comienza a disminuir.

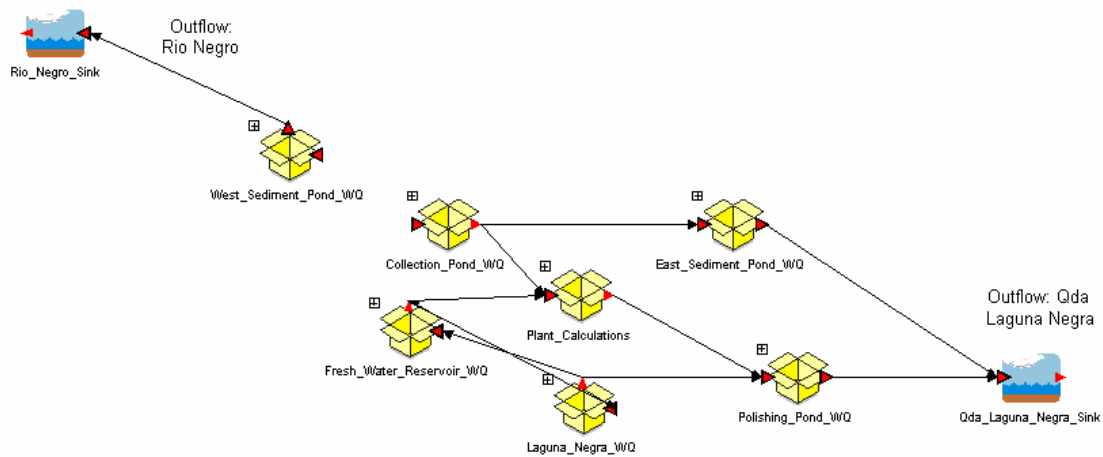
Como el modelo es de balance de masa y no toma en cuenta un control geoquímico, se encuentran valores por encima de 2000 mg/L, que son mayores a la solubilidad del sulfato de calcio. Es decir, en la realidad los valores máximos que se podrían medir estarían alrededor de los 2000 mg/L, ya que cualquier concentración mayor a este valor precipitará.

Del mismo modo, se pueden calcular los valores en los cuerpos de agua receptores. El punto SWQN-40 es el punto más cercano a la descarga (Figura E-14). Una

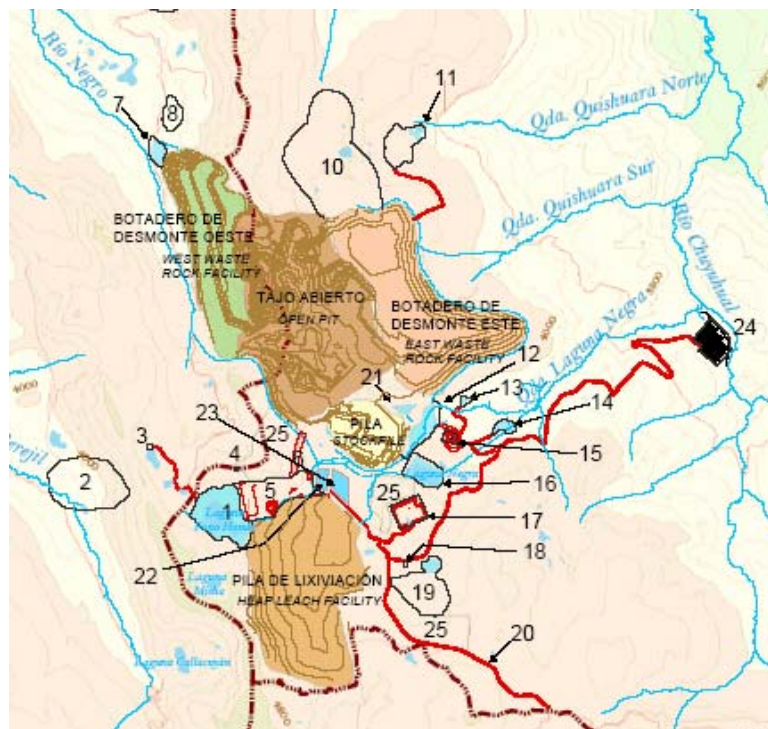
preocupación constante aquí es el cianuro. En este caso el modelo ayuda a orientar la toma de decisiones sobre las medidas de mitigación necesarias.

Las predicciones indican que durante la operación de la mina, no existirá ningún problema en cuanto a la concentración de cianuro. Sin embargo, durante la época de cierre la concentración de cianuro podría alcanzar valores mayores al valor guía de la OMS. Estos picos están relacionados al tratamiento de la solución de cianuro durante el cierre. Los picos están relacionados a las descargas durante los periodos de estiaje. Por lo tanto, durante el cierre deberá descargarse sólo durante la época de lluvia para evitar concentraciones por encima del valor guía de la OMS.

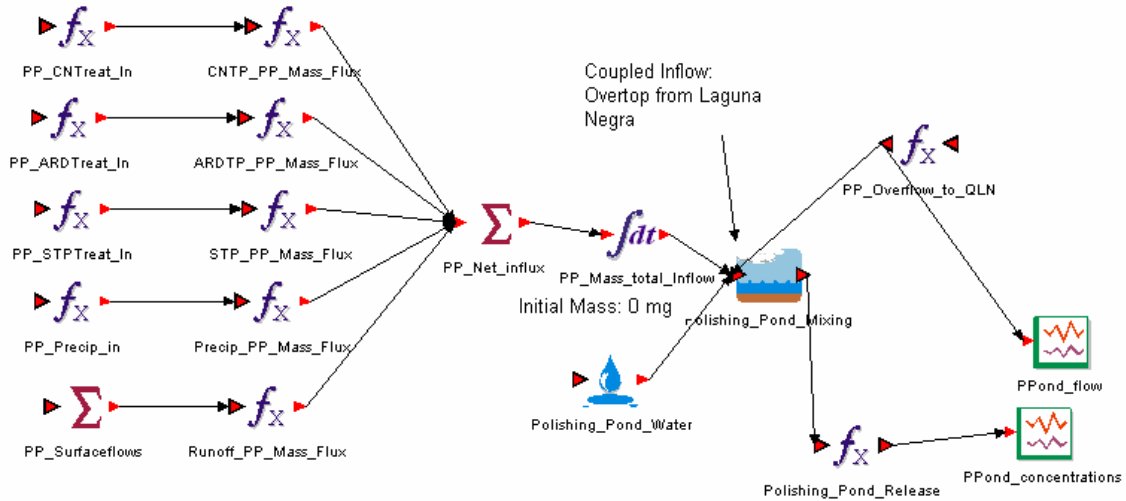
**Figura E8 Esquema del modelo de mezcla para la predicción de calidad de aguas en Alto Chicama.**



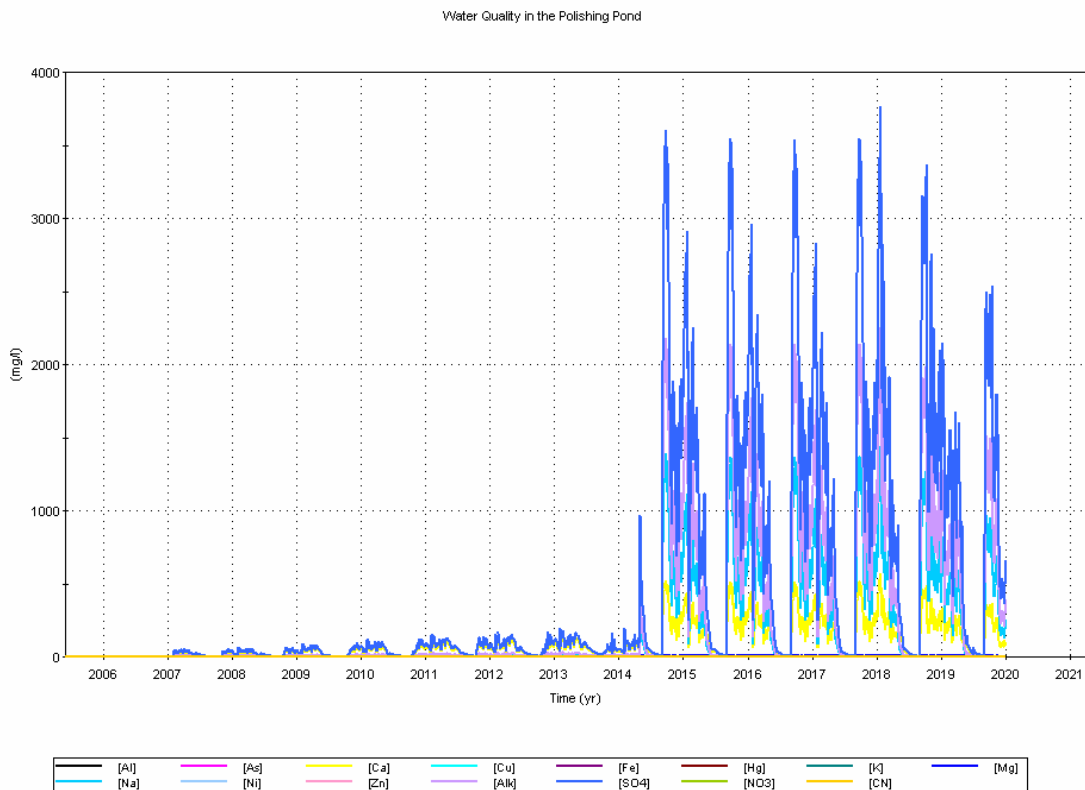
**Figura E9 Plano de distribución de las instalaciones del proyecto Alto Chicama utilizado para la elaboración del modelo de balance de aguas y calidad de aguas**



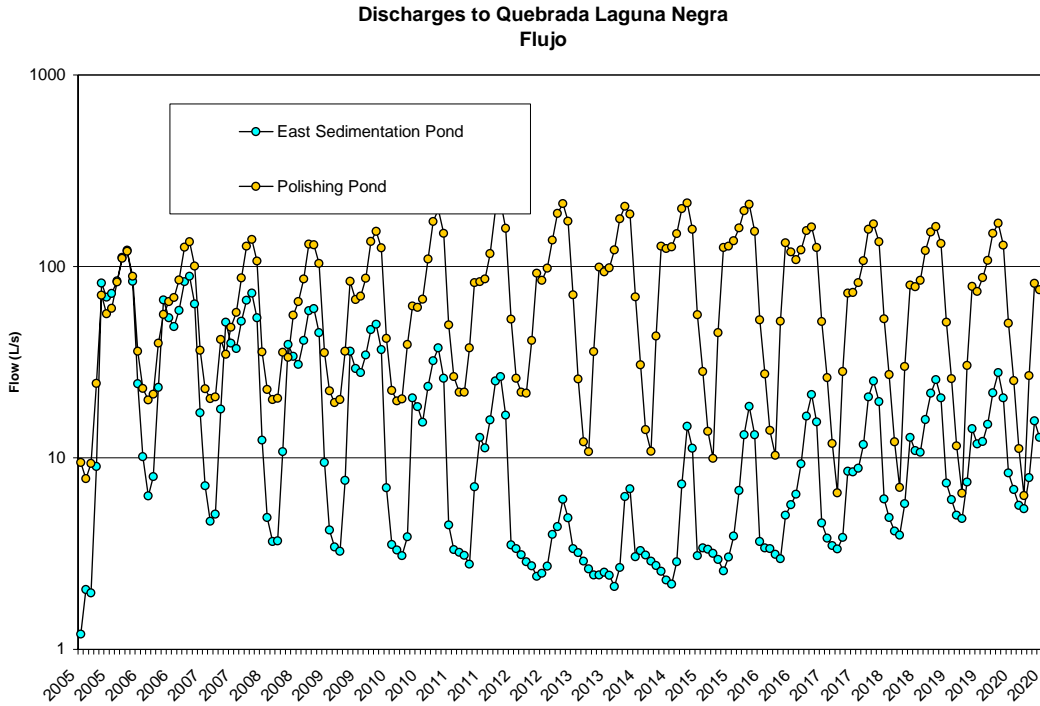
**Figura E-10** Esquema de cálculos de mezcla en la poza de limpieza



**Figura E-11** Resultados del modelo de mezcla para la poza de limpieza



**Figura E-12 Resultados del modelamiento para las descargas de la poza de sedimentación este y la poza de limpieza**



**Figura E-13 Modelamiento de la descarga de sulfatos de la poza de sedimentación este y la poza de limpieza**

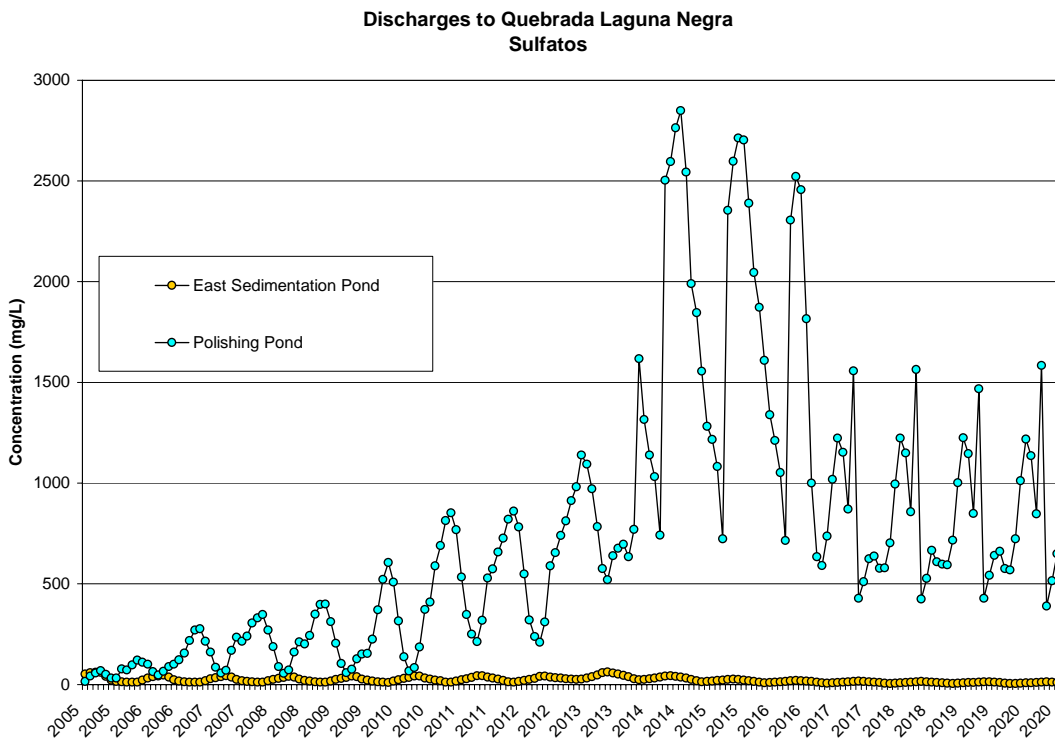




Figura E-14 Predicción de la concentración de cianuro en el cuerpo receptor

