



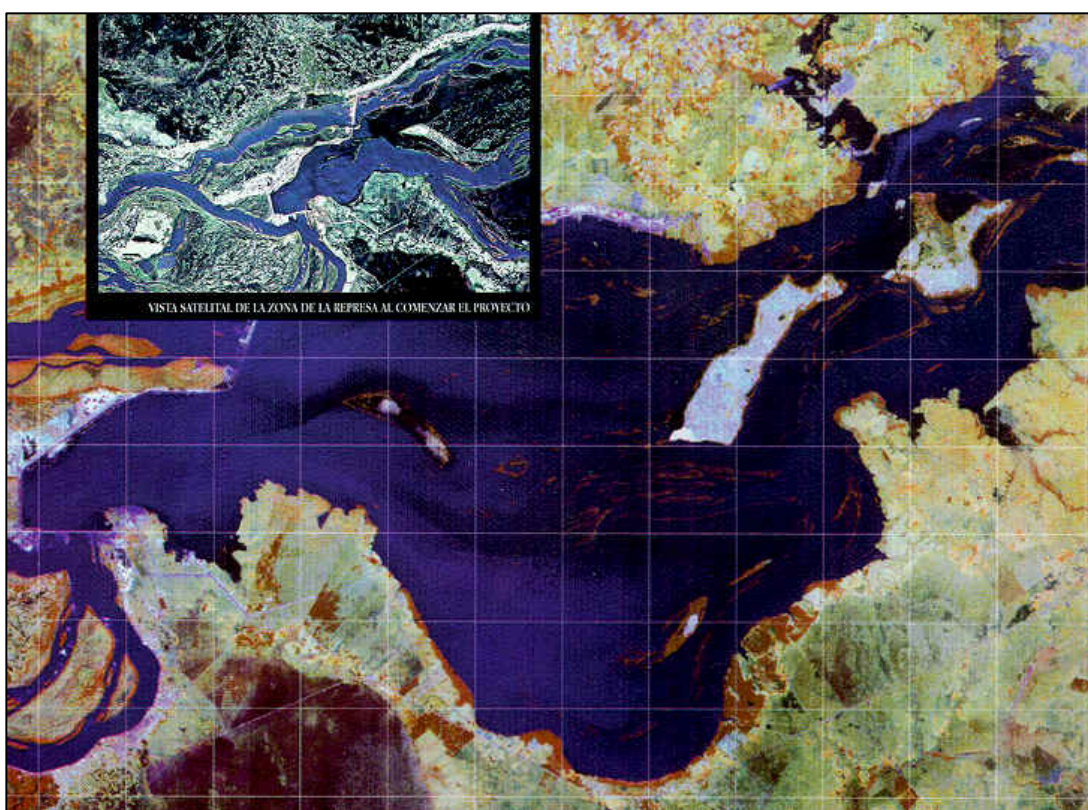
INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS
REPÚBLICA ARGENTINA



entidad binacional
Yacyretá

**PROYECTO “CALIDAD DEL AGUA
EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ Y SUS AFLUENTES”**

MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE METALES EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ



Proyecto LHA 225
Informe LHA 11-225-05
Ezeiza, agosto de 2005

LABORATORIO DE HIDRÁULICA

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE:

Ing. Oscar V. LICO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS:

Dr. Raúl A. LOPARDO

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA:

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL:

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO:

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Ing. Oscar E. NATALE

Ing. Christian U. ÁLVAREZ TAGLIABUE

Sr. Pablo GARCÍA (Estudiante Ingeniería)

INFORME PRODUCIDO POR

Ángel N. MENÉNDEZ

Pablo GARCÍA

Christian U. ÁLVAREZ TAGLIABUE

INDICE

1 INTRODUCCIÓN

2 MODELACIÓN DEL TRANSPORTE

2.1 DATOS DISPONIBLES

2.2 MODELO DE TRANSPORTE

2.2 ENTRADA Y SALIDA POR LA CORRIENTE

2.3 MODELACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

2.3.1 Cobre

2.3.2 Plomo

2.3.3 Cromo

3 ANÁLISIS DE ESCENARIOS

3.1 ESCENARIOS FUTUROS

3.2 ELEVACIÓN DE LA COTA DE EMBALSE

3.2.1 Cobre

3.2.2 Plomo

3.2.3 Cromo

4 CONCLUSIONES

REFERENCIAS

1 INTRODUCCIÓN

La descarga de sustancias tóxicas hacia el medio ambiente, como resultado de las actividades antrópicas, constituye un problema de significación para la calidad del agua y la sustentabilidad de los ecosistemas acuáticos.

En particular, en el caso de un embalse, éste actúa como un sedimentador de sólidos en suspensión, los cuales transportan generalmente la mayor parte de la carga de elementos tóxicos. En consecuencia, el lecho del embalse se convierte en un acumulador de tóxicos. Si bien esto se traduce, en primera instancia, en condiciones estables de almacenamiento, la posibilidad de que se produzcan perturbaciones, tales como remociones naturales (erosión) o artificiales (dragado) del sedimento de fondo, o que se desarrollen condiciones para la emisión, puede conducir a situaciones comprometidas debido a la movilización de tóxicos desde el fondo. En consecuencia, ese almacenamiento constituye un factor de peligro que es necesario evaluar para anticipar eventuales consecuencias.

En el presente informe, y en base a las conclusiones sobre el análisis de los parámetros prioritarios de calidad de agua en el embalse de Yacyretá (Jaime et al. 2004), se describe la modelación del transporte de cobre, plomo y cromo en el embalse, que permite estimar, para las condiciones presentes y para algunos escenarios futuros, la distribución de concentración de metales en sedimento, su tasa de acumulación y la distribución de masa intercambiable, como indicadores del nivel de peligro.

2 MODELACIÓN DEL TRANSPORTE

2.1 DATOS DISPONIBLES

Las figuras 2.1.1 a 2.1.3 muestran las series de datos de concentración en columna de agua de cobre, plomo y cromo, respectivamente, en las estaciones de entrada y salida al embalse de Yacretá. Se trata de las correspondientes a Candelaria (E1-MI, EI-1 C y E1-MD) como entrada y las del vertedero del brazo Aña-Cuá (EI-12 y EI-10 MD) y del brazo principal (E10-MI y EI-11) como salida, cuya ubicación se aprecia en la figura 2.1.4. Se observa que se trata de datos escasos, principalmente en el caso del plomo y el cromo. Se ha incluido la curva de tendencia del caudal, como referencia. Se observa que, tal cual era de esperarse, no es posible distinguir ningún tipo de correlación entre la tendencia de variación hidrodinámica y las series de datos de concentración de metales.

También se dispuso de algunos datos puntuales de concentración de estos metales en sedimento, lo cuales se presentan más abajo.

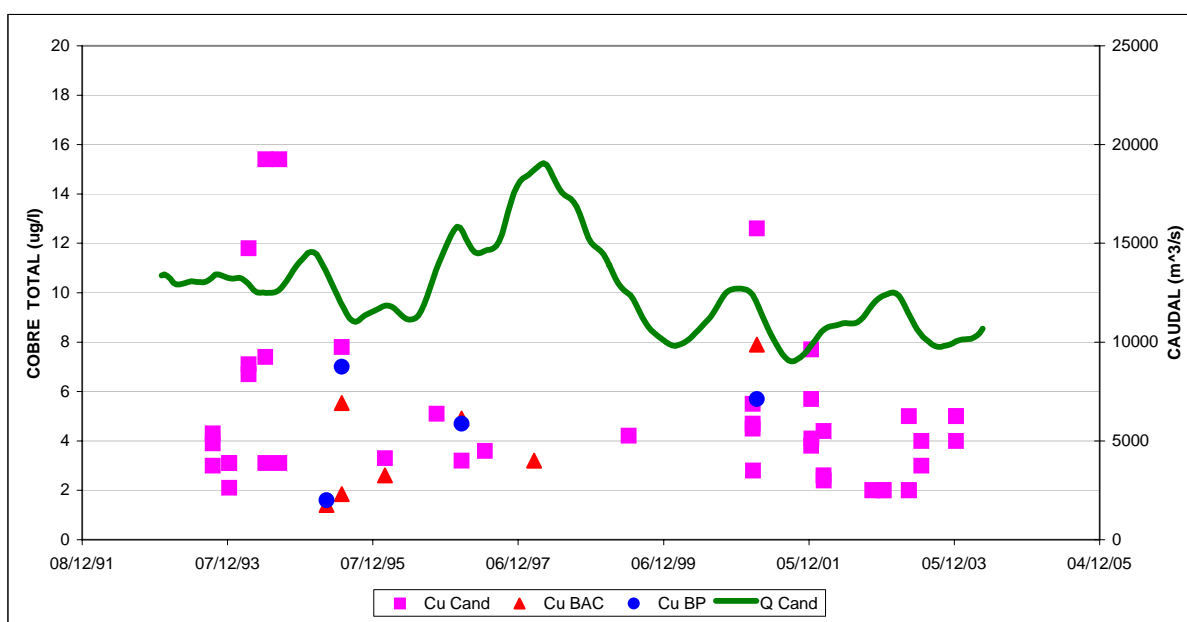


Figura 2.1.1 Series temporales de concentración de cobre en la columna de agua

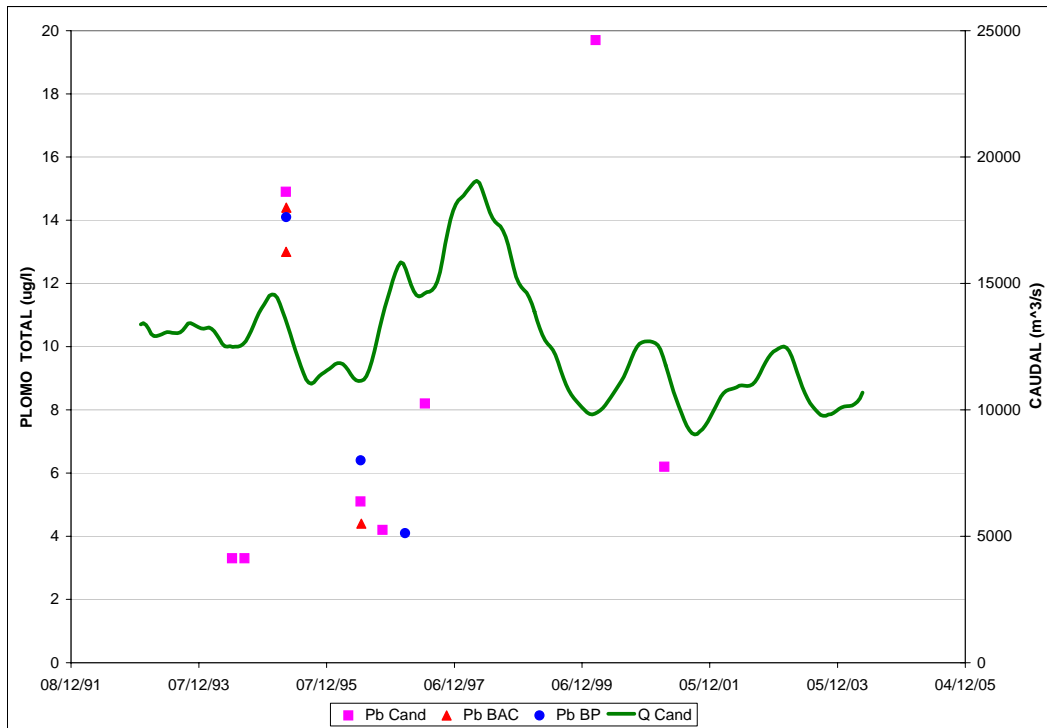


Figura 2.1.2 Series temporales de concentración de plomo en la columna de agua

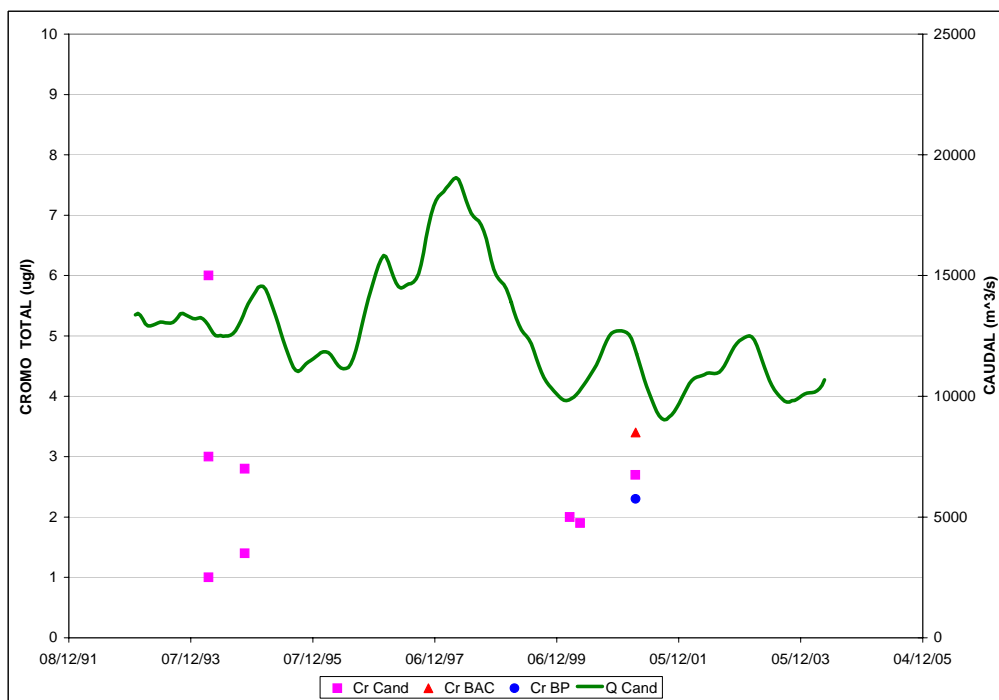


Figura 2.1.3 Series temporales de concentración de cromo en la columna de agua



Figura 2.1.4 Estaciones de monitoreo

2.2 MODELO DE TRANSPORTE

El modelo de transporte de metales se construyó en base al modelo de transporte de sólidos suspendidos (Alvarez Tagliabúe & Menéndez 2004), el cual se alimenta con los resultados provistos por el modelo hidrodinámico global del embalse de Yacyretá (Alvarez Tagliabúe & Menéndez 2003).

Los metales son transportados parcialmente en fase disuelta y el resto en fase particulada. Es la fracción particulada la que está sujeta a la posibilidad de sedimentación y, en consecuencia, de acumulación en el fondo del embalse.

La fracción disuelta f_d puede expresarse como

$$f_d = \frac{1}{1 + K_p \text{ SS} \times 10^{-6}} \quad (2.1)$$

donde K_p [l/kg] es el coeficiente de partición y SS [mg/l] la concentración de sólidos suspendidos. Para el coeficiente de partición se ha adoptado la siguiente expresión (Mills et al. 1985):

$$K_p = K_{po} \text{ SS}^\alpha \quad (2.2)$$

donde los parámetros K_{po} y α tienen los valores sugeridos en la tabla 2.2.1, en la que se distingue entre cuerpos de agua lóticos (corrientes) y leníticos (lagos).

Tabla 2.2.1
Parámetros del modelo de partición

Metal	Cuerpos lóticos		Cuerpos leníticos	
	K_{po}	α	K_{po}	α
Cobre	$1,04 \times 10^6$	-0,74	$2,85 \times 10^6$	-0,90
Plomo	$0,31 \times 10^6$	-0,19	$2,04 \times 10^6$	-0,53
Cromo	$3,36 \times 10^6$	-0,93	$2,17 \times 10^6$	-0,27

2.3 MODELACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Dada la imposibilidad de distinguir tendencias de evolución temporal, debido a la escasez de datos y sus errores de medición, se decidió plantear la modelación de sus valores medios. Entonces, en base a los datos de flujos máxicos de cada metal en la estación de entrada (Candelaria), obtenidos como el producto de la concentración por el caudal correspondiente al día de medición, se definió el rango representativo de valores de flujos máxicos ingresantes para ese metal, tratando de englobar en ese rango la mayor cantidad de datos posibles, pero eventualmente dejando afuera a los valores más apartados de la nube de puntos de modo de reducir al mínimo razonable su amplitud, tal como se muestra en línea de trazos azul en la figura 2.3.1 para el cobre. Luego se determinó un valor medio de flujo máxico entrante, como la media logarítmica de los valores extremos, el cual se muestra en trazo azul lleno en la figura 2.3.1 para el caso del cobre.

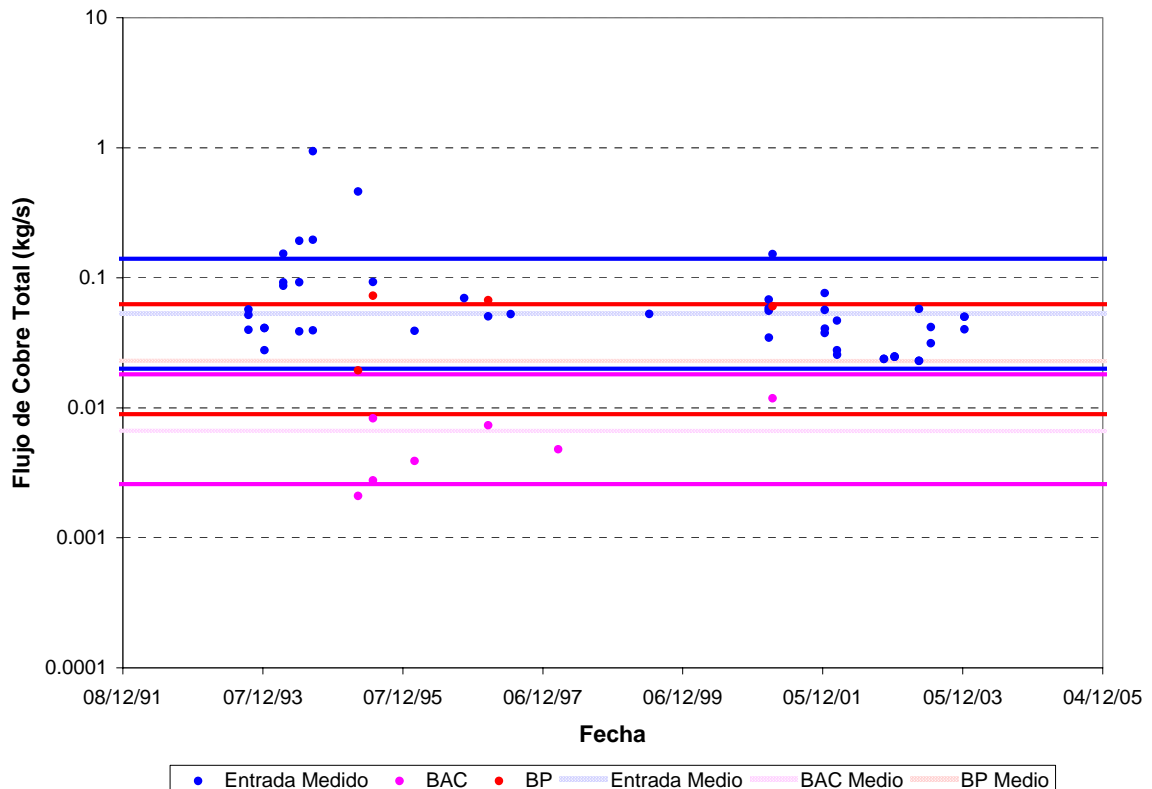


Figura 2.3.1 Rangos de flujos máxicos de entrada y salida de cobre

El modelo de transporte de metales determina, entonces, el rango correspondiente de concentraciones de salida, para cada brazo. Para que el modelo sea aceptable, esos rangos de concentraciones deberían ser representativos de los valores medidos.

Del modelo también surge la distribución de concentración de metal sobre todo el embalse, discriminada entre fase disuelta y particulada. Esta última representa, a su vez, la concentración esperable en el sedimento de fondo, por lo que puede ser comparada con los valores puntuales medidos, constituyendo esta una segunda prueba de aceptabilidad.

Se trabajó con el caudal medio, de 15.000 m³/s. Para la salida, en base a la serie de registros históricos, se consideró un caudal por el Brazo Aña-Cuá de 3000 m³/s como una media representativa. Se utilizaron los valores de los parámetros de partición correspondientes a cuerpo lóxico (tabla 2.1.1), que proveyeron resultados más aceptables que los asociados a cuerpo lenítico. Para el caso del plomo, estos fueron algo reajustados para obtener un acuerdo más aceptable (ver más abajo). En estas condiciones, la fracción de metal en fase particulada resultó claramente mayor al 50% para el cobre y el cromo, y menor a 50% para el plomo.

2.3.1 Cobre

La figura 2.3.1 y la tabla 2.3.1 muestran los resultados del modelo para la banda de flujos máxicos de cobre en columna de agua a la salida. Se observa que las bandas de salida esencialmente contienen todos los valores medidos para ambos brazos, con una tendencia a la sobrestimación para el Brazo Aña Cuá (BAC) y a la subestimación para el Brazo Principal (BP), pero que se considera satisfactorio desde el punto de vista global. El flujo máxico de salida representa el 58% del de entrada. De este, el 78% sale por el BP. Estos valores de flujos máxicos corresponden a las concentraciones que se presentan en la tabla 2.3.2. Se observa que la relación entre concentraciones extremas y media es un factor 2,65.

Tabla 2.3.1

Rango de flujos máxicos representativos de cobre (g/s)

Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC	Salida BP	Salida Total
Mínimo	20	3	9	12
Medio	53	7	24	31
Máximo	140	18	63	81

Tabla 2.3.2

Rango de concentraciones representativas de cobre (µg/l)

Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC	Salida BP
Mínimo	1,33	0,86	0,75
Medio	3,53	2,29	1,97
Máximo	9,33	6,05	5,22

En la figura 2.3.2 se muestra la distribución de la concentración de cobre en columna de agua (incluyendo fases disuelta y particulada) de acuerdo al modelo, para el escenario de concentración media en la entrada, mientras que la figura 2.3.3 presenta la concentración en fase particulada.

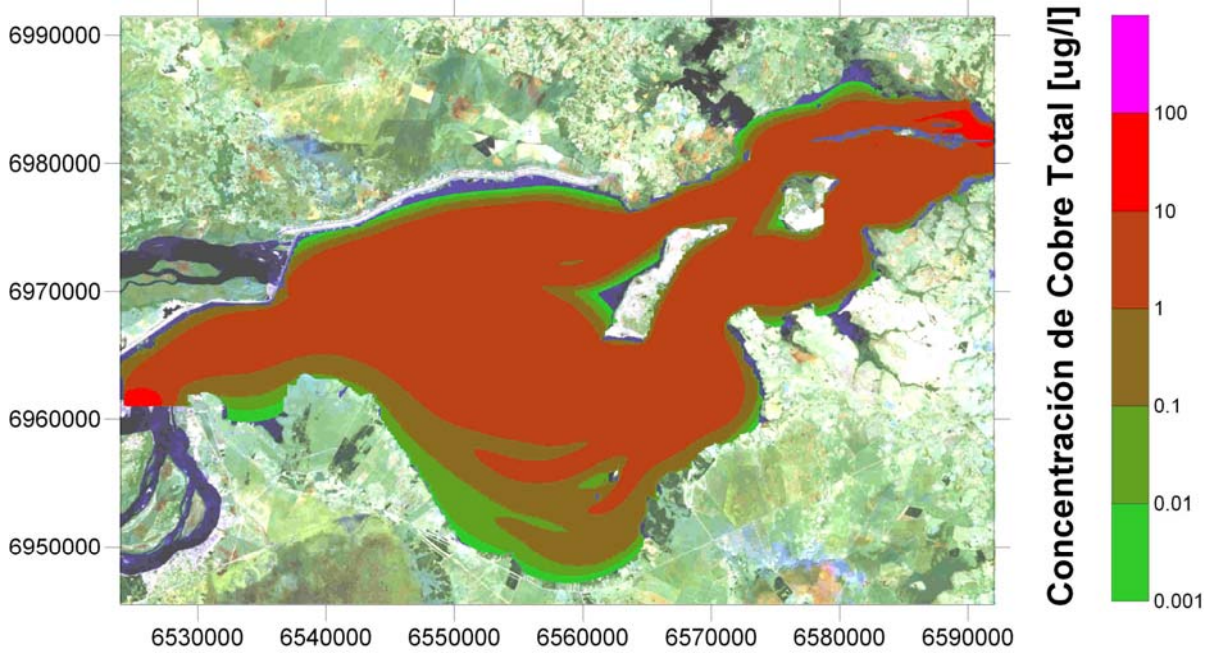


Figura 2.3.2 Distribución de concentración de cobre en columna de agua para el escenario medio

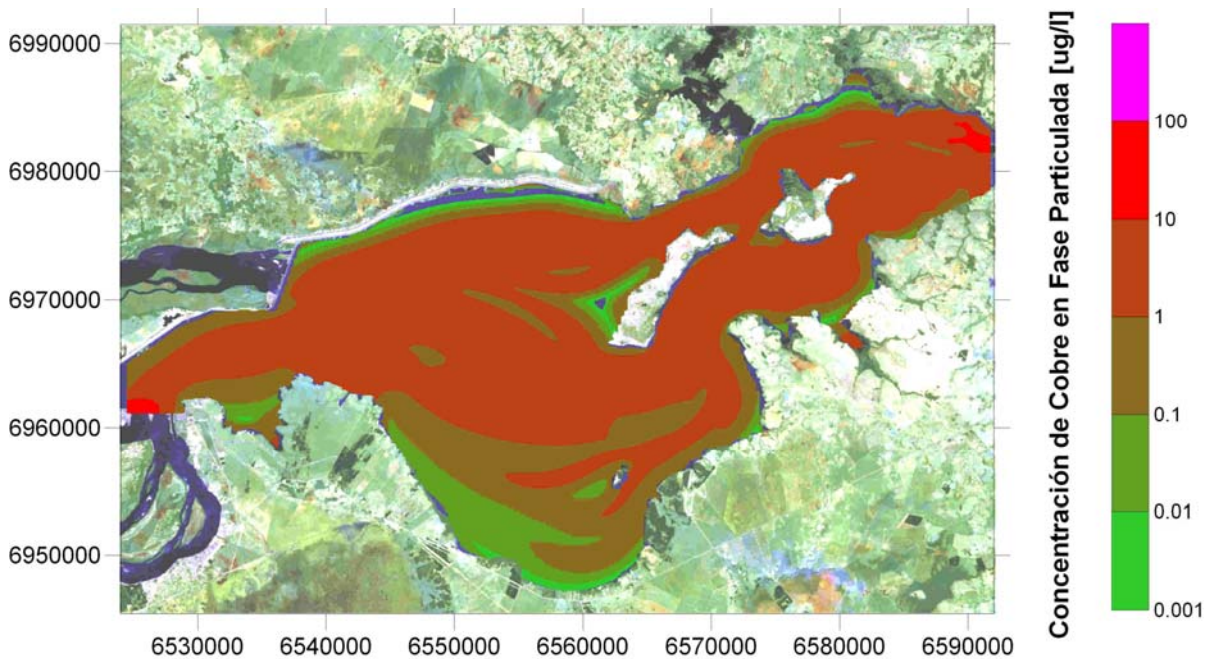


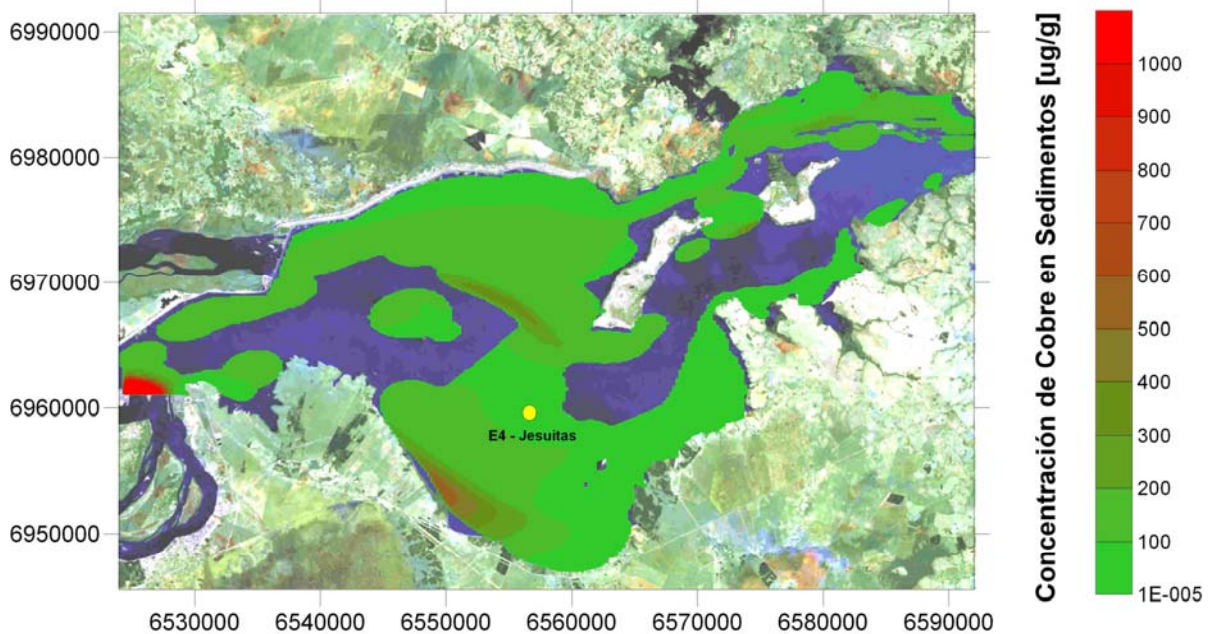
Figura 2.3.3 Distribución de concentración de cobre particulado en columna de agua para el escenario medio

Las figuras 2.3.4.a a 2.3.4.c muestran la distribución de la concentración de cobre en sedimento para los escenarios de concentración máxima, media y mínima en la entrada. Allí se identifica la estación de muestreo E4-Jesuitas, que cae en los rangos de concentración 0/100, 200/300 y 700/800 $\mu\text{g/g}$, respectivamente. La tabla 2.3.3 presenta valores de concentración de cobre en sedimentos medidos en esa estación. Efectuando la comparación entre valores predichos y medidos, se concluye que el modelo provee, entonces, el orden de magnitud correcto de la concentración de cobre en sedimentos, a pesar de las simplificaciones introducidas en la modelación. Esto constituye un nuevo elemento de aceptabilidad del modelo propuesto. En particular, la comparación es mejor con los resultados correspondientes a un escenario entre mínimo y medio, de modo que puede concluirse que la modelación actúa hacia el lado de la seguridad.

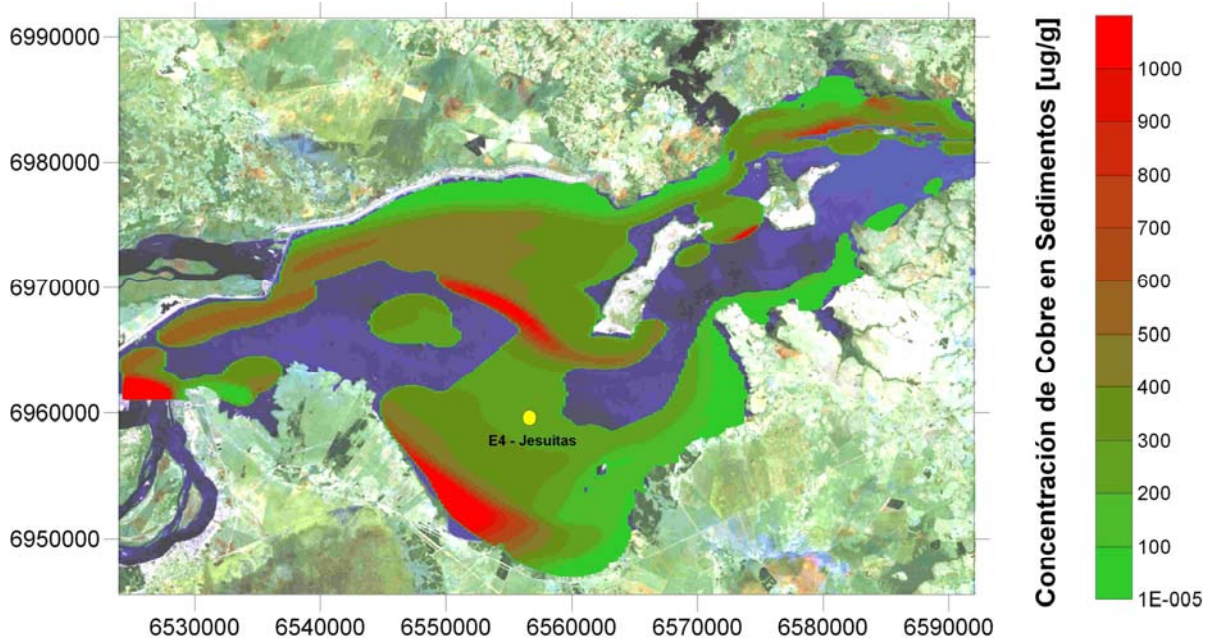
Tabla 2.3.3

Concentraciones medidas de cobre en sedimento en la estación E4-Jesuitas
Fuente: EBY

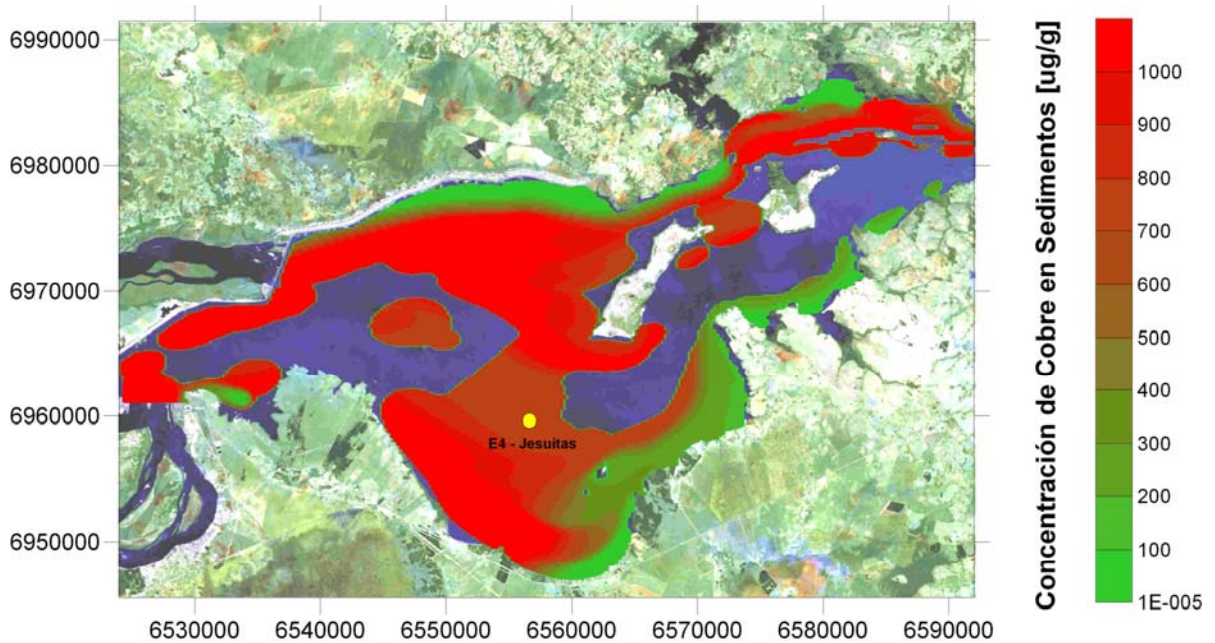
Fecha	Concentración ($\mu\text{g/g}$)
21/12/2002	57.6
25/04/2003	185
18/12/2003	138



a) Escenario de concentración mínima



b) Escenario de concentración media



c) Escenario de concentración máxima

Figura 2.3.4 Distribución de concentración de cobre en sedimento

En la figura 2.3.5 se muestra la distribución de tasa de sedimentación de cobre, para el escenario de concentración media en la entrada. Se observa que, en las zonas donde se produce sedimentación, la tasa se haya mayormente en el rango 0,1 a 10 g/m²/año. Para los escenarios de máxima y mínima (en los que las concentraciones se incrementan o disminuyen en un factor 2,65, respectivamente) el rango es básicamente el mismo. Integrando esta tasa sobre toda el área del embalse, se obtiene la masa acumulada anual de cobre en el embalse que se muestra en la tabla 2.3.4.

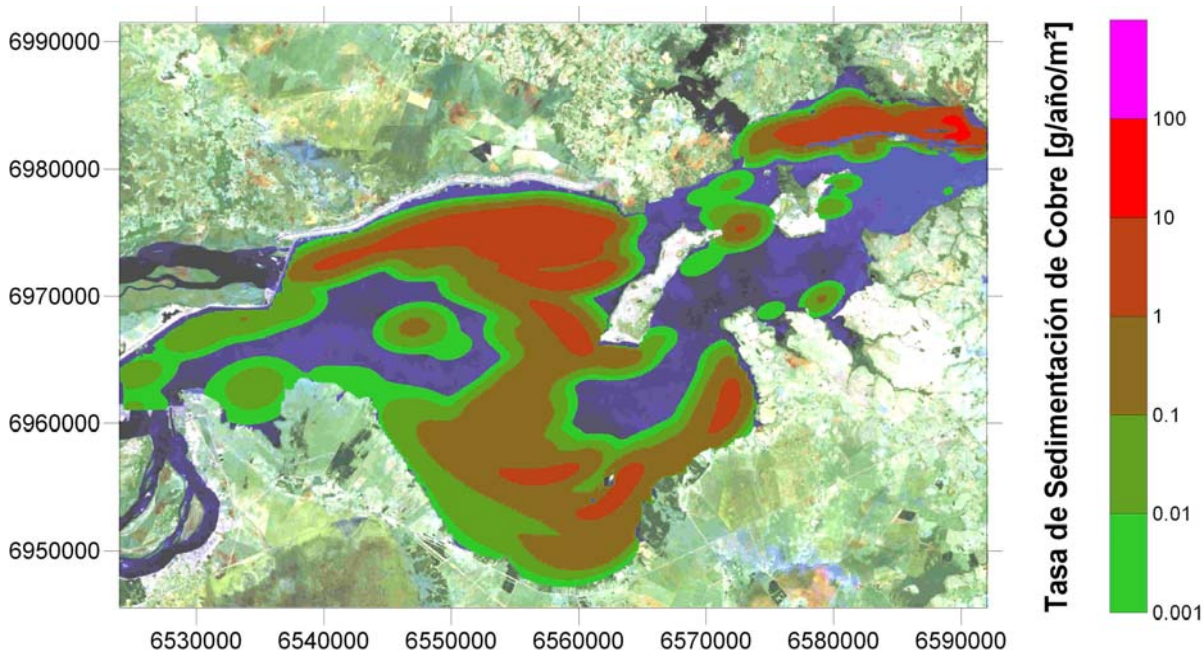


Figura 2.3.5 Distribución de tasa de sedimentación de cobre para el escenario medio

Tabla 2.3.4

Rango de tasas de sedimentación total de cobre en el embalse

Valor	Sedimentación (ton/año)
Mínimo	219
Medio	580
Máximo	1540

Si se considera que sólo es intercambiable lo acumulado en una capa superficial de espesor de 10 cm (el resto del metal está “enterrado”), entonces se obtiene la distribución de masa intercambiable que se muestra en la figura 2.3.6, para el escenario de concentración media en la entrada. Integrándola sobre todo el embalse, se obtienen los valores de masa total intercambiable presentados en la tabla 2.3.5.

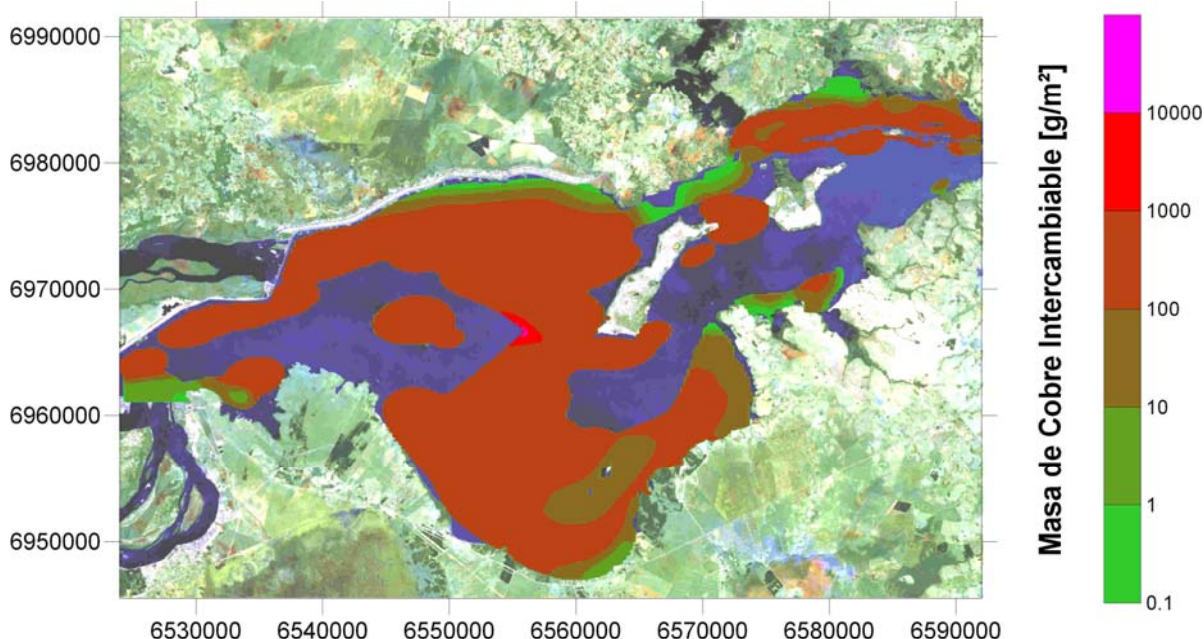


Figura 2.3.6 Distribución de masa de cobre sedimentada intercambiable para el escenario medio

Tabla 2.3.5

Rango de valores de masa total de cobre intercambiable en el embalse

Valor	Masa (miles de ton)
Mínimo	82
Medio	217
Máximo	574

2.3.2 Plomo

En la figura 2.3.7 y la tabla 2.3.6 se muestran la banda de flujo másico de plomo en columna de agua fijada en la entrada y las correspondientes bandas a la salida del embalse. Se nota la escasez relativa de datos, en comparación al cobre (figura 2.3.1), sobre todo a la salida. Los relativamente altos valores de flujo másico a la salida obligaron a bajar algo los parámetros de partición correspondientes a cuerpo lóxico (tabla 2.1.1); en particular, el parámetro K_{po} fue disminuido desde $0,31 \times 10^6$ a $0,10 \times 10^6$. Así y todo, las bandas de salida subestiman los valores medidos. El grado de acuerdo mostrado en la figura 2.3.7 se considera, de todos modos, el mejor alcanzable en virtud de la escasez de datos, de modo que se lo ha tomado como aceptable. El flujo másico de salida alcanza al 91% del valor de la entrada, de lo cuales el 61% egresa por el BP. Las concentraciones asociadas a las bandas de flujos másicos se presentan en la tabla 2.3.7. La relación entre concentraciones extremas y media es ahora de un factor 3,33.

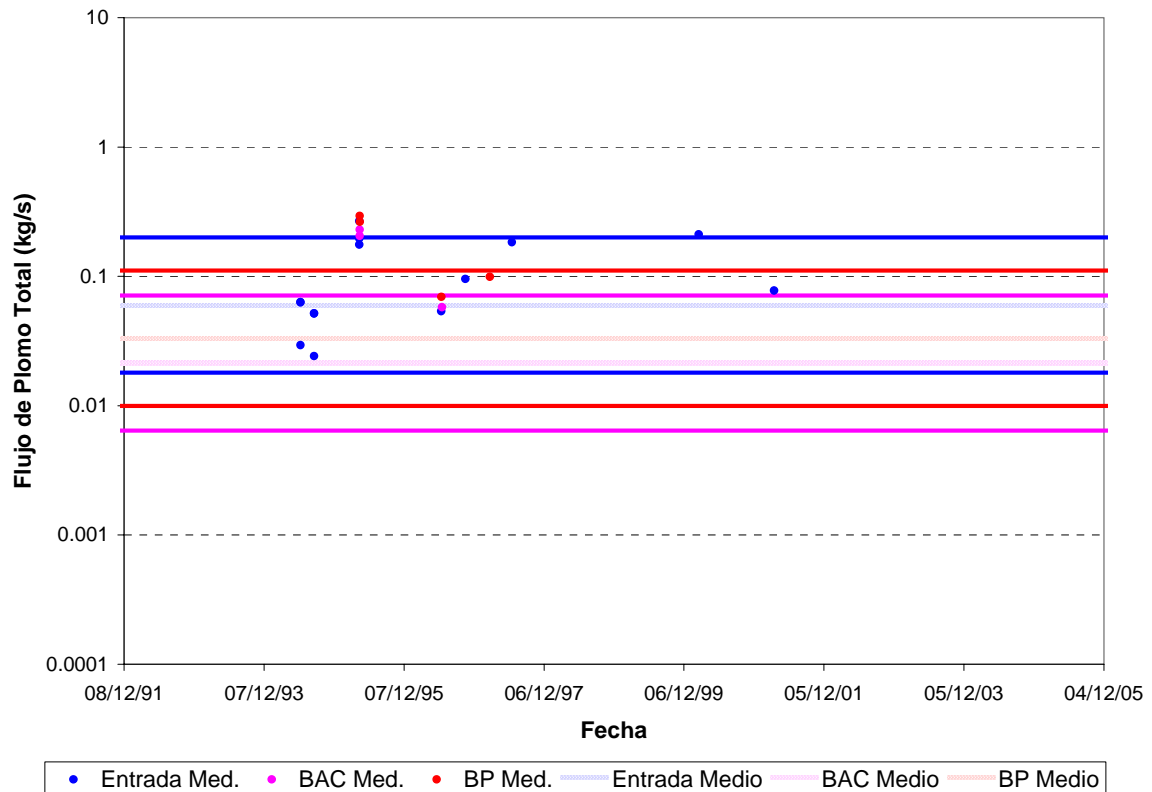


Figura 2.3.7 Rangos de flujos máxicos de entrada y salida de plomo

Tabla 2.3.6

Rango de flujos máxicos representativos de plomo (g/s)

Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC	Salida BP	Salida Total
Mínimo	18	6	10	16
Medio	60	21	33	55
Máximo	200	71	111	182

Tabla 2.3.7

Rango de concentraciones representativas de plomo ($\mu\text{g/l}$)

Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC	Salida BP
Mínimo	1,20	2,14	0,83
Medio	4,00	7,12	2,77
Máximo	13,33	23,73	9,23

Las figuras 2.3.8 y 2.3.9 muestran las distribuciones de la concentración total de plomo en columna de agua y la concentración en fase particulada, respectivamente, para el escenario de concentración media en la entrada.

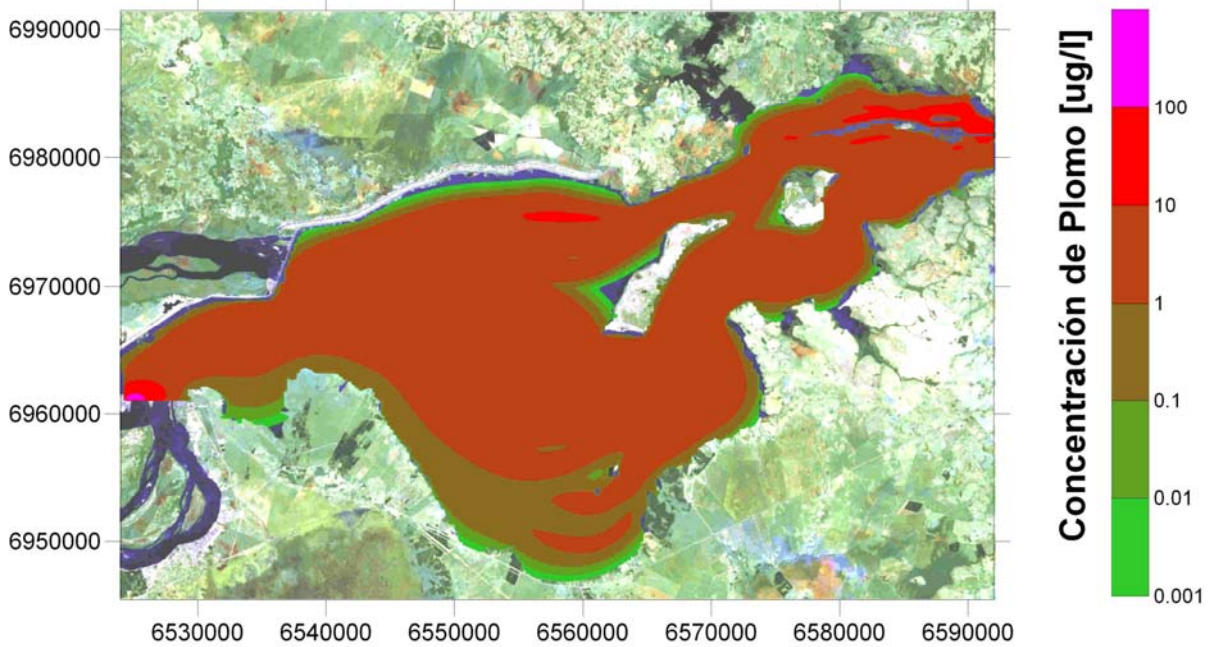


Figura 2.3.8 Distribución de concentración de plomo en columna de agua para el escenario medio

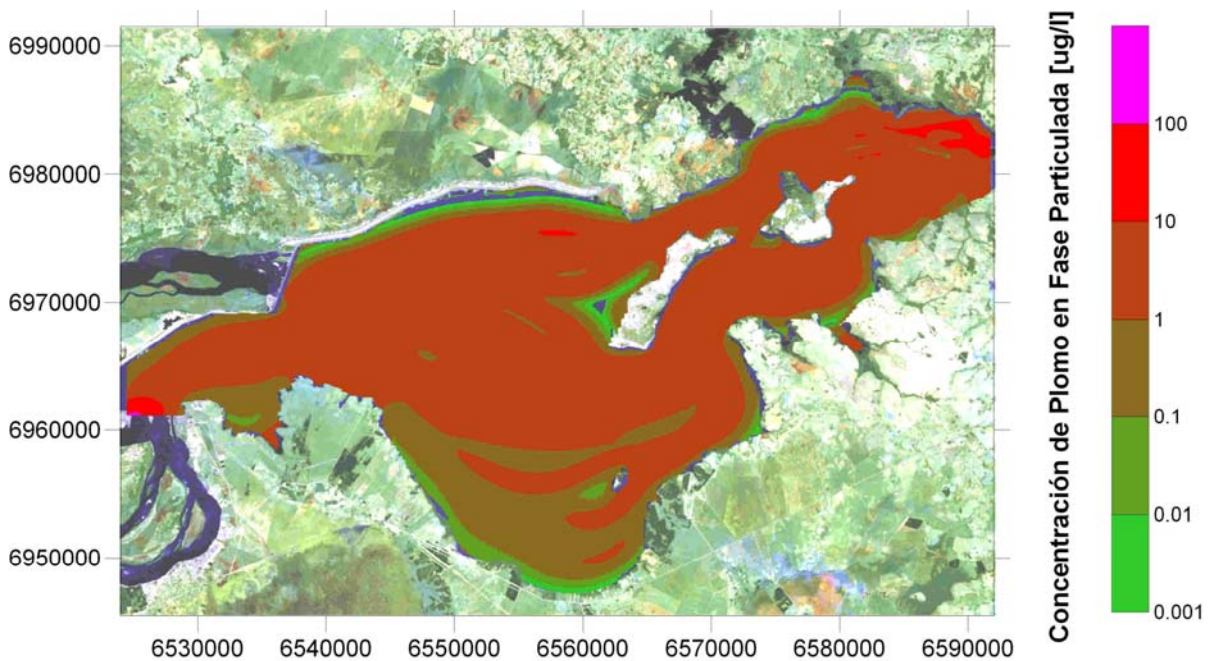
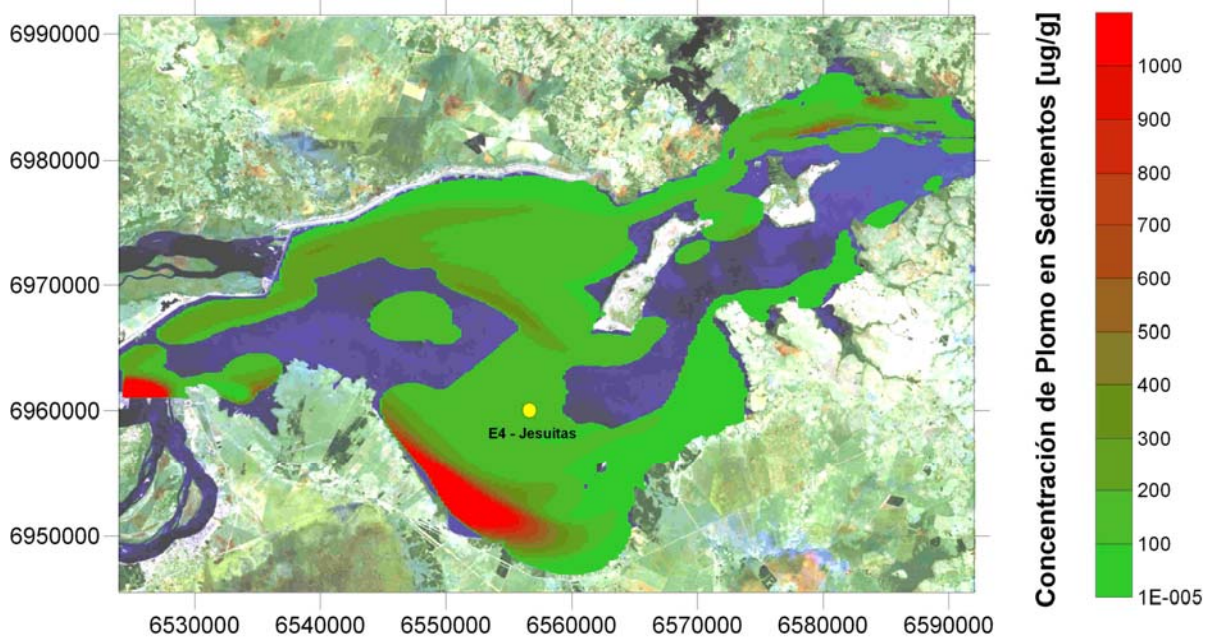
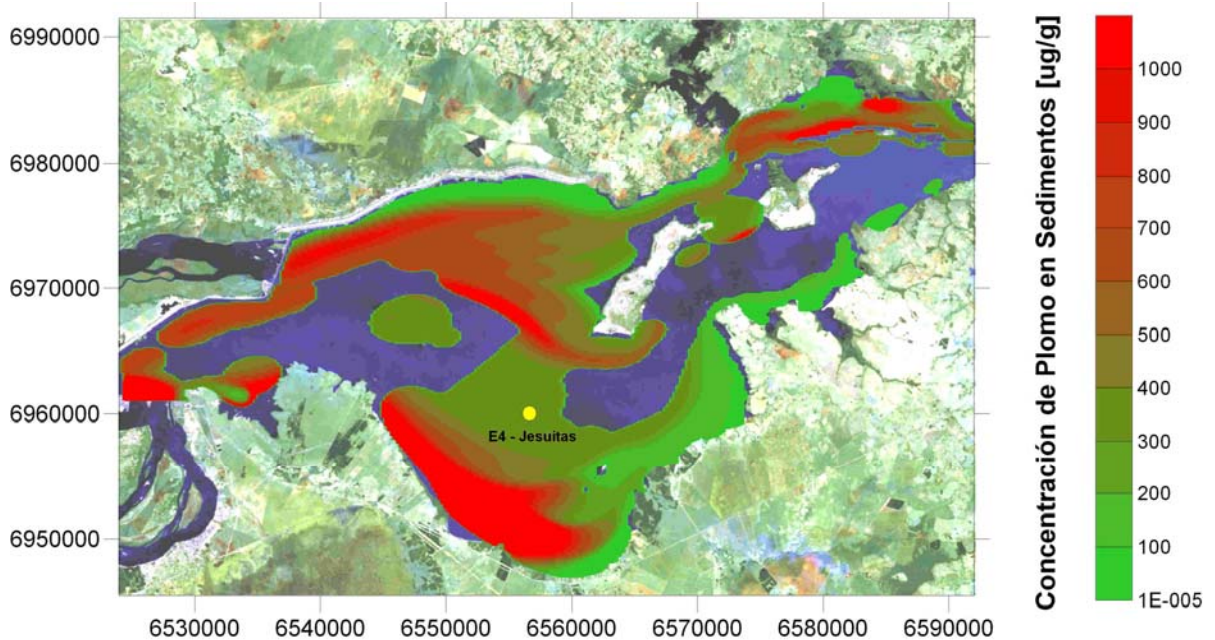


Figura 2.3.9 Distribución de concentración de plomo particulado en columna de agua para el escenario medio

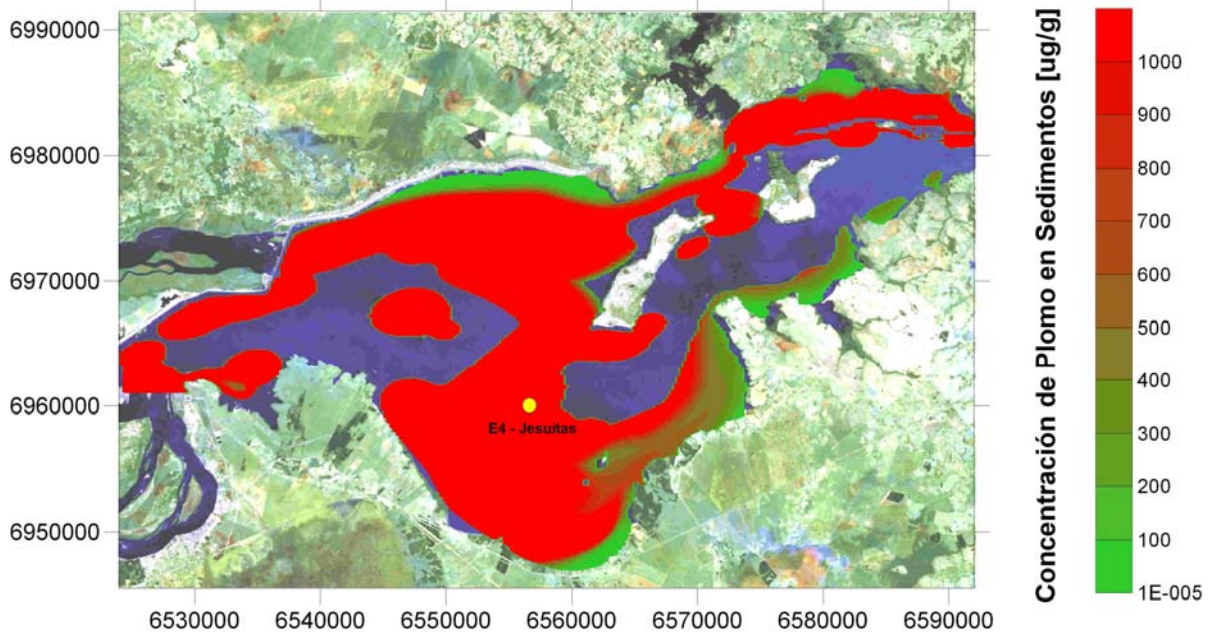
En las figuras 2.3.10.a a 2.3.10.c se muestra la distribución de la concentración de plomo en sedimento para los escenarios de concentración máxima, media y mínima en la entrada. La estación de muestreo E4-Jesuitas cae en los rangos de concentración 0/100, 300/400 y > 1000 $\mu\text{g/g}$, respectivamente. La tabla 2.3.8 presenta valores medidos de concentración de plomo para esa estación. Comparando entre valores predichos y medidos, se observa que el acuerdo es mejor con los resultados correspondientes al escenario de mínima, de modo que se concluye que la modelación actúa hacia el lado de las seguridad.



a) Escenario de concentración mínima



b) Escenario de concentración media



c) Escenario de concentración máxima

Figura 2.3.10 Distribución de concentración de plomo en sedimento

Tabla 2.3.8

Concentraciones medidas de plomo en sedimento en la estación E4-Jesuitas
Fuente: EBY

Fecha	Concentración (µg/g)
21/12/2002	29,5
25/04/2003	46
25/06/2003	35,3
17/10/2003	5,81
18/12/2003	30,9
24/02/2004	32,7

La figura 2.3.11 presenta la distribución de tasa de sedimentación de plomo, para el escenario de concentración media en la entrada. Se observa que, en las zonas donde se produce sedimentación, la tasa se haya mayormente en el rango 0,1 a 10 g/m²/año. En la tabla 2.3.9 se muestra la masa acumulada anual de plomo en el embalse, obtenida por integración.

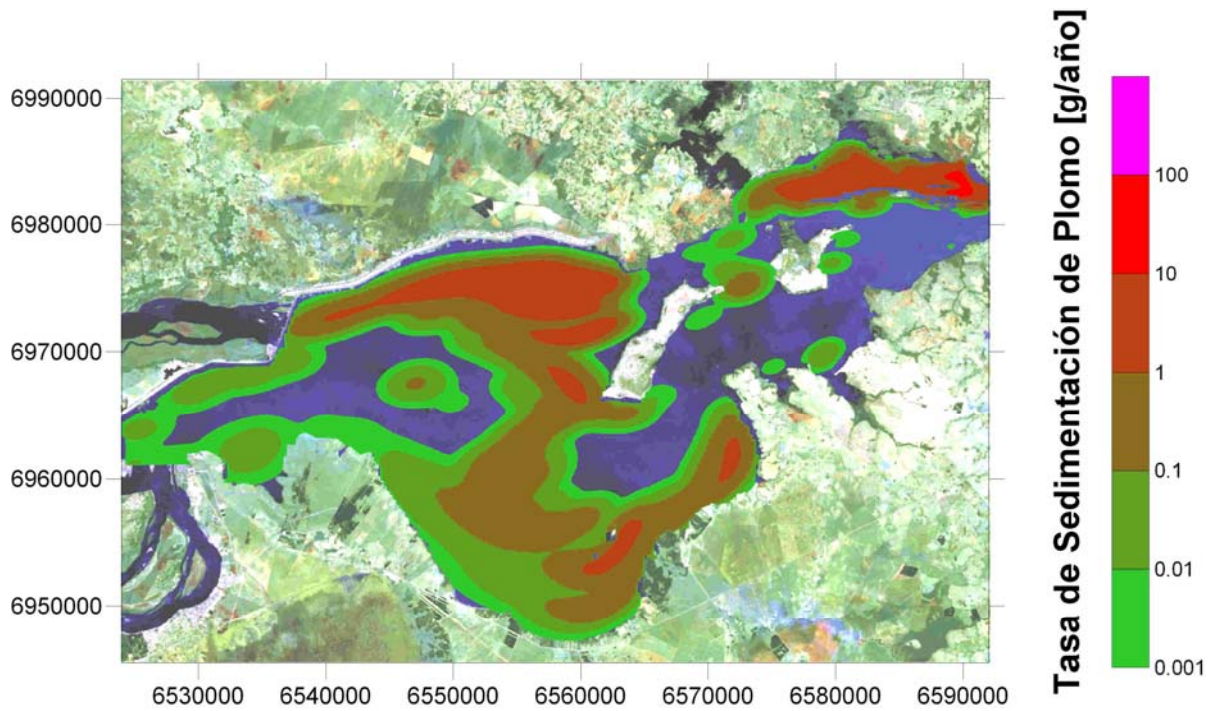


Figura 2.3.11 Distribución de tasa de sedimentación de plomo para el escenario medio

Tabla 2.3.9

Rango de tasas de sedimentación total de plomo en el embalse

Valor	Sedimentación (ton/año)
Mínimo	145
Medio	482
Máximo	1607

La distribución de masa intercambiable de plomo se muestra en la figura 2.3.12, para el escenario de concentración media en la entrada. De su integración surgen los valores de masa total intercambiable presentados en la tabla 2.3.10.

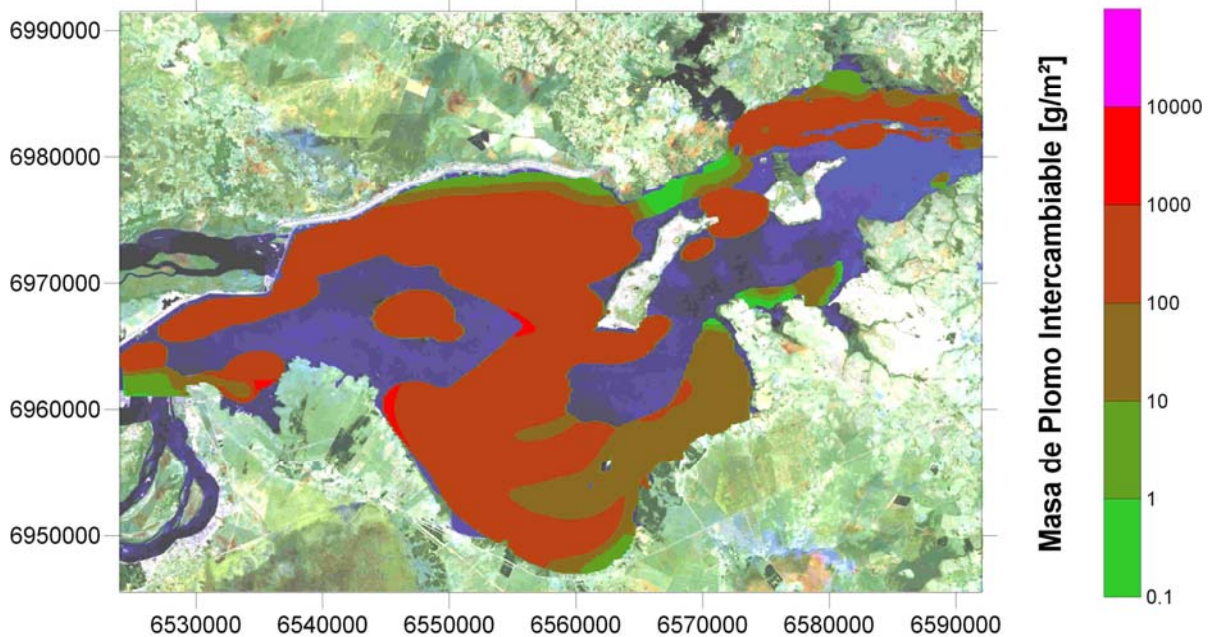


Figura 2.3.12 Distribución de masa de plomo sedimentada intercambiable para el escenario medio

Tabla 2.3.10

Rango de valores de masa total de plomo intercambiable en el embalse

Valor	Masa (miles de ton)
Mínimo	41
Medio	137
Máximo	455

2.3.3 Cromo

La figura 2.3.13 y la tabla 2.3.11 presentan la banda de flujo másico de cromo en columna de agua fijada en la entrada y las correspondientes bandas a la salida del embalse. Se observa una escasez de datos aún mayor que para el plomo (figura 2.3.7). Las bandas de salida comprenden a los valores medidos, de modo que la modelación se considera aceptable. El flujo másico de salida constituye el 54% del de la entrada, saliendo el 80% por el BP. Las concentraciones asociadas a las bandas de flujos másicos se presentan en la tabla 2.3.12. La relación entre concentraciones extremas y media es de un factor 2,80.

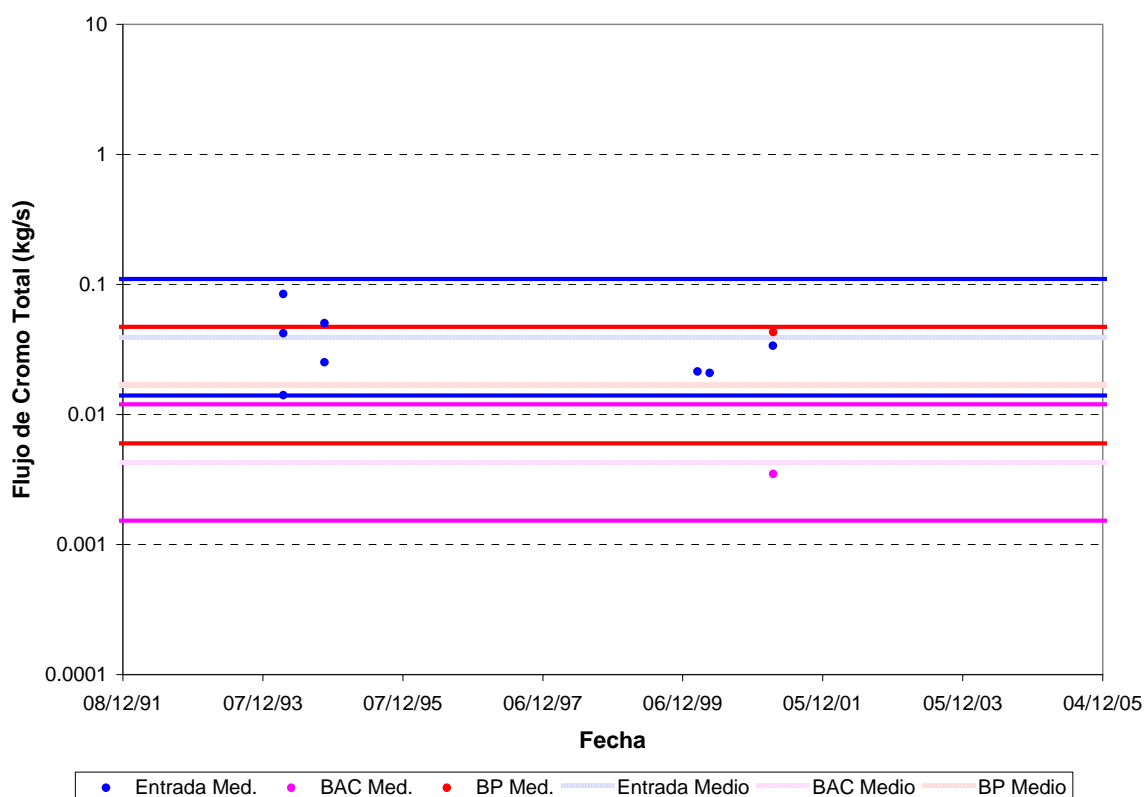


Figura 2.3.13 Rangos de flujos máxicos de entrada y salida de cromo

Tabla 2.3.11

Rango de flujos máxicos representativos de cromo (g/s)

Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC	Salida BP	Salida Total
Mínimo	14	2	6	8
Medio	39	4	17	21
Máximo	110	12	47	159

Tabla 2.3.12

Rango de concentraciones representativas de cromo ($\mu\text{g/l}$)

Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC	Salida BP
Mínimo	0,93	0,51	0,50
Medio	2,62	1,43	1,41
Máximo	7,33	4,00	3,94

En las figuras 2.3.14 y 2.3.15 se muestran las distribuciones de la concentración total de cromo en columna de agua y la concentración en fase particulada, respectivamente, para el escenario de concentración media en la entrada.

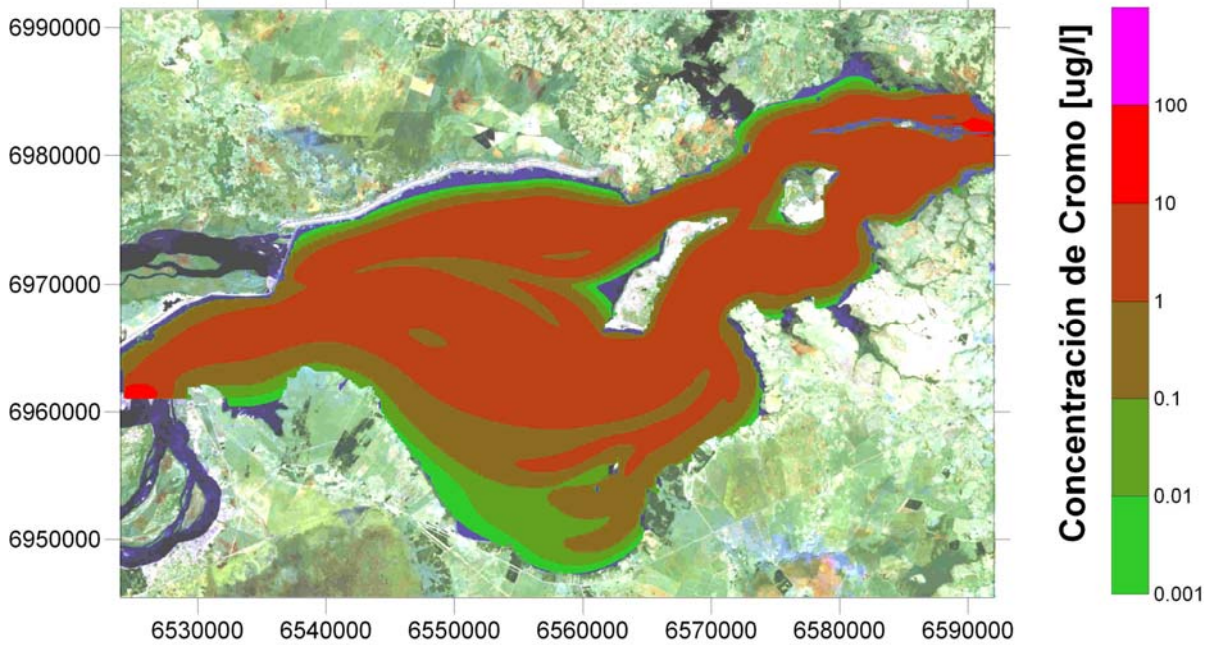


Figura 2.3.14 Distribución de concentración de cromo en columna de agua para el escenario medio

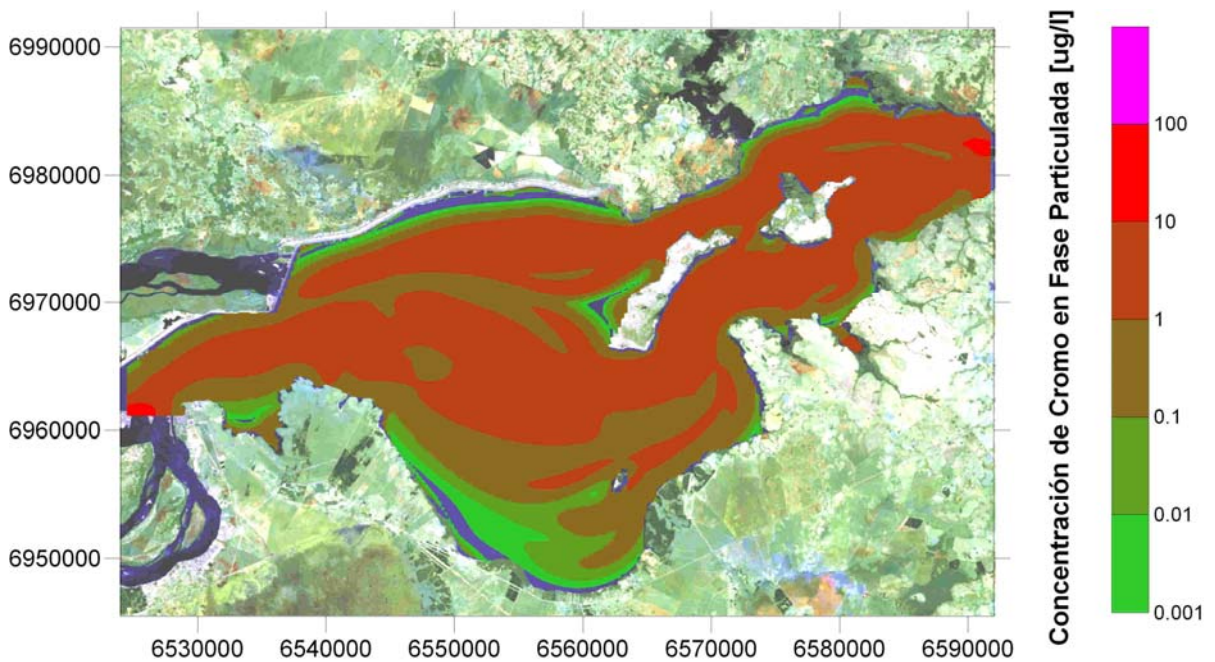
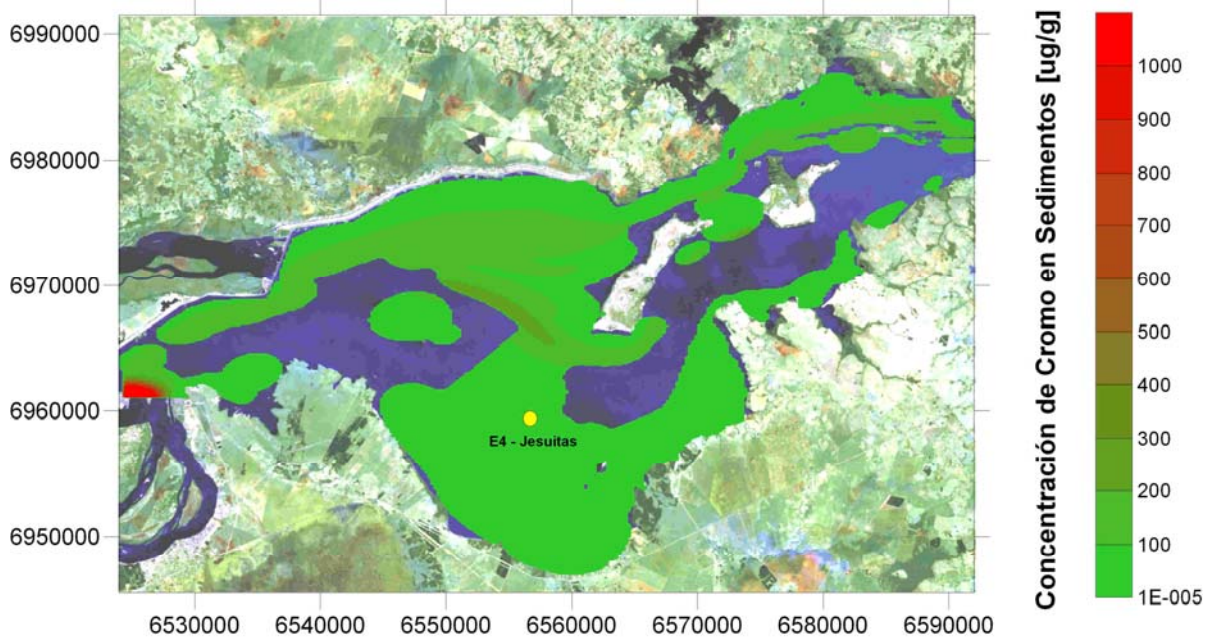
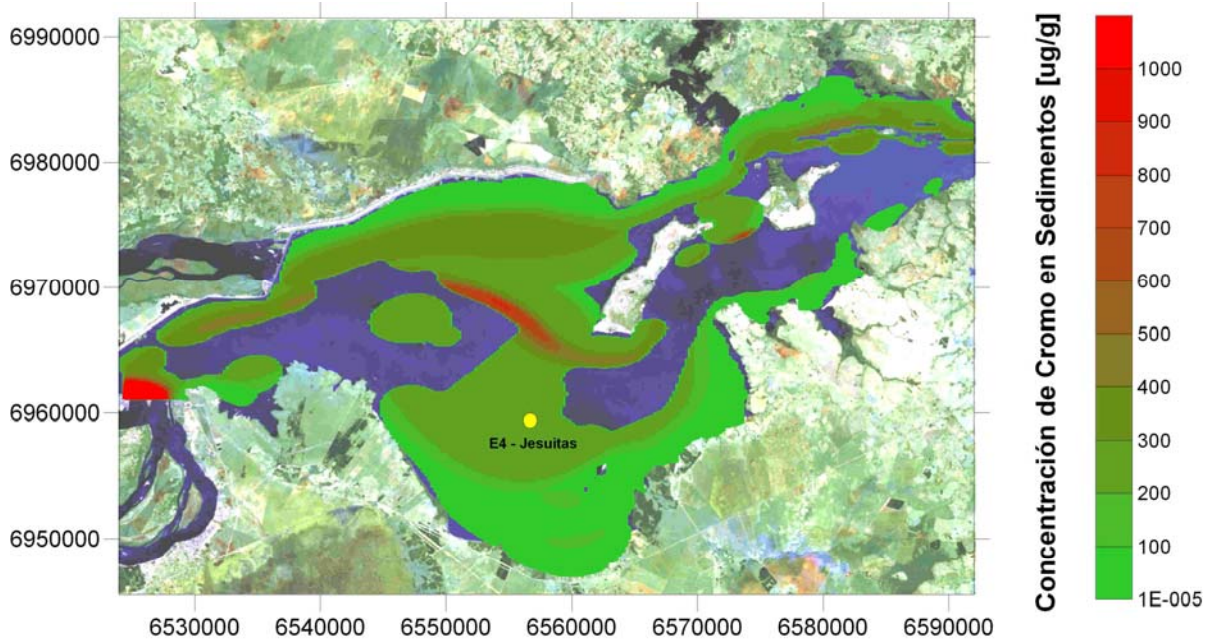


Figura 2.3.15 Distribución de concentración de cromo particulado en columna de agua para el escenario medio

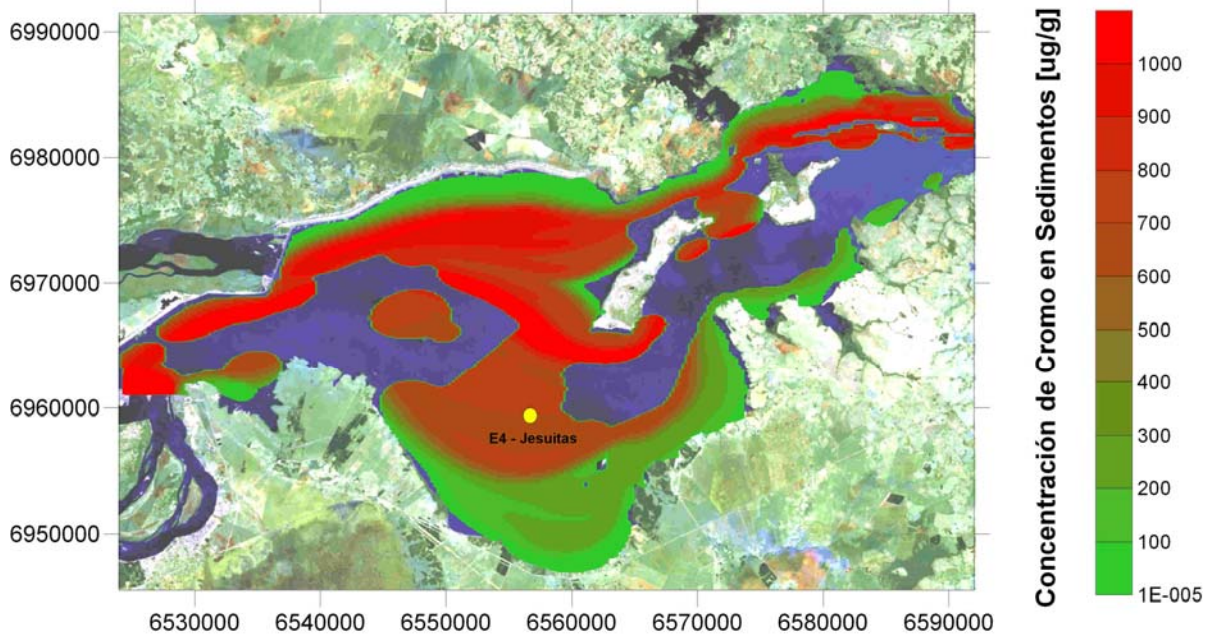
Las figuras 2.3.16.a a 2.3.16.c muestran la distribución de la concentración de cromo en sedimento para los escenarios de concentración máxima, media y mínima en la entrada. La estación de muestreo E4-Jesuitas cae en los rangos de concentración 0/100, 200/300 y 800/900 $\mu\text{g/g}$, respectivamente. La tabla 2.3.13 presenta valores medidos de concentración de cromo para esa estación. De la comparación entre valores predichos y medidos, se obtiene el mejor acuerdo con los resultados correspondientes al escenario de mínima, de modo que se concluye que la modelación actúa hacia el lado de la seguridad.



a) Escenario de concentración mínima



b) Escenario de concentración media



c) Escenario de concentración máxima

Figura 2.3.16 Distribución de concentración de cromo en sedimento

Tabla 2.3.13

Concentraciones medidas de cromo en sedimento en la estación E4-Jesuitas
Fuente: EBY

Fecha	Concentración (µg/g)
21/12/2002	26,3
25/04/2003	67,8
25/06/2003	54
17/10/2003	7,94
18/12/2003	53,3
24/02/2004	43,7

En la figura 2.3.17 se muestra la distribución de tasa de sedimentación de cromo, para el escenario de concentración media en la entrada. Se observa que, en las zonas donde se produce sedimentación, la tasa se haya mayormente en el rango 0,1 a 10 g/m²/año. En la tabla 2.3.14 se muestra la masa acumulada anual de cromo en el embalse, obtenida por integración.

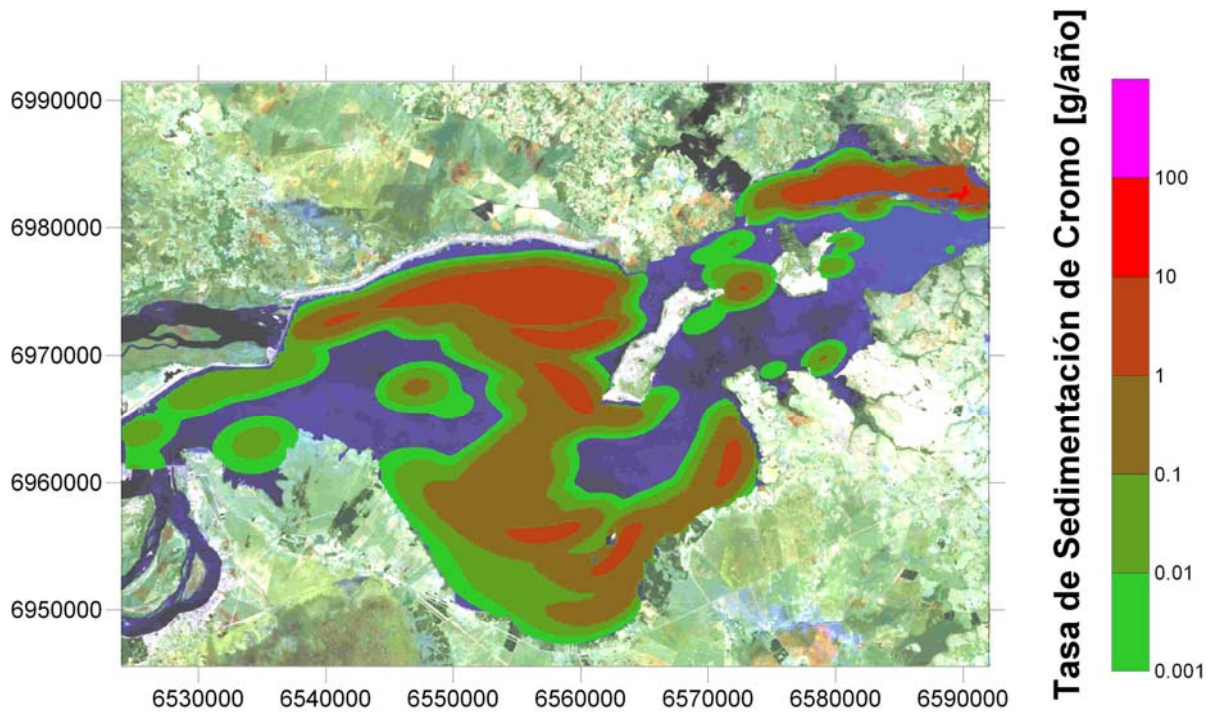


Figura 2.3.17 Distribución de tasa de sedimentación de cromo para el escenario medio

Tabla 2.3.14

Rango de tasas de sedimentación total de cromo en el embalse

Valor	Sedimentación (ton/año)
Mínimo	168
Medio	470
Máximo	1317

La distribución de masa intercambiable de cromo se muestra en la figura 2.3.18, para el escenario de concentración media en la entrada. De su integración surgen los valores de masa total intercambiable presentados en la tabla 2.3.15.

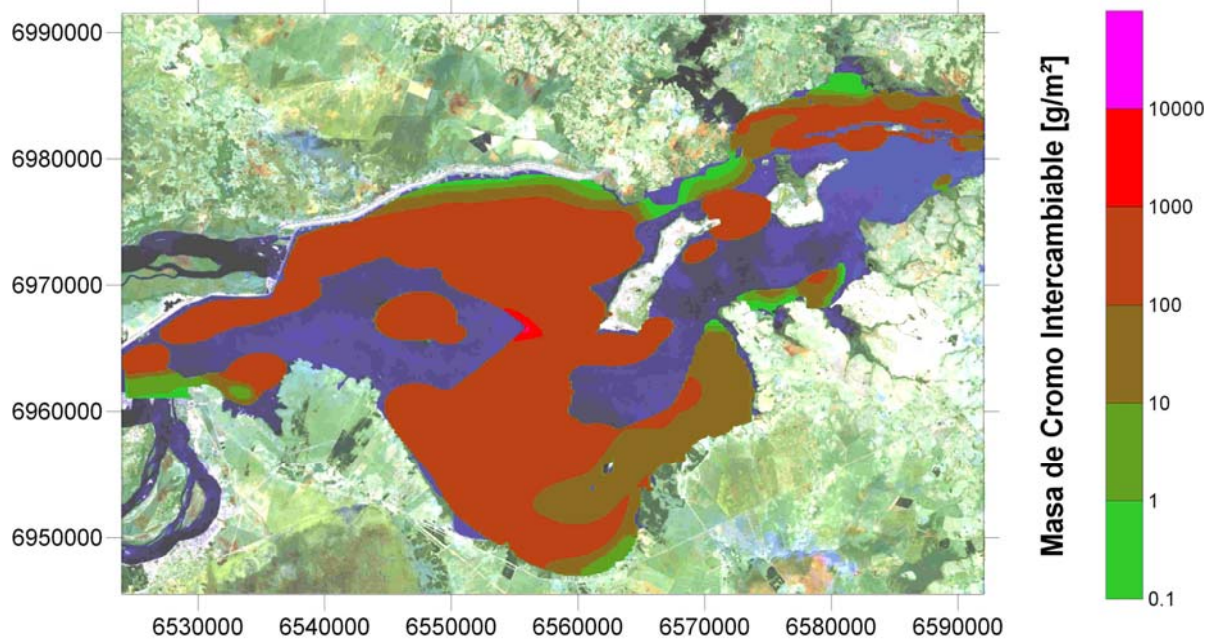


Figura 2.3.18 Distribución de masa de cromo sedimentada intercambiable para el escenario medio

Tabla 2.3.15

Rango de valores de masa total de cromo intercambiable en el embalse

Valor	Masa (miles de ton)
Mínimo	61
Medio	171
Máximo	479

3 ANÁLISIS DE ESCENARIOS

3.1 ESCENARIOS FUTUROS

Los escenarios futuros de interés incluyen, por un lado, el aumento de la cota del embalse y, por el otro, un aumento del aporte ingresante.

Una consideración de importancia es el caudal de salida del Brazo Aña-Cuá. Dado que la política de operación establecida es erogar un caudal de 1500 m³/s, salvo los eventuales mayores caudales durante picos de crecidas extremas, ese fue el caudal adoptado para los ensayos de escenarios futuros. En la figura 3.1.1 se muestra la serie de tiempo del caudal saliente por el Brazo Aña-Cuá, donde se observa que esta ha sido efectivamente la política seguida desde fines de 1999 en adelante. Dado que la calibración del modelo se efectuó para un caudal de 3000 m³/s, representativo de la etapa histórica de toma de datos, se incluye entre los escenarios futuros el de cota 76 con 1500 m³/s por el Brazo Aña-Cuá.

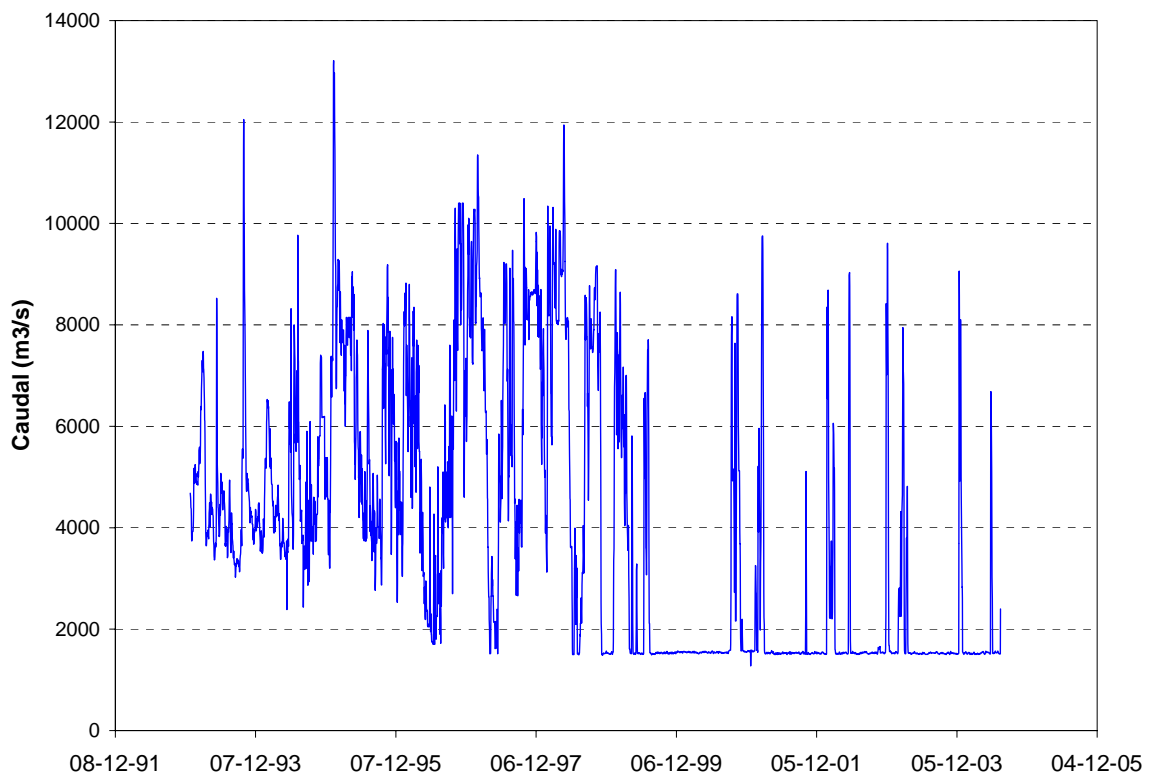


Figura 3.1.1 Serie temporal de caudales erogados por el Brazo Aña-Cuá.

Como escenarios de cotas de embalse se fijaron los siguientes:

- a) 76 msnm
- b) 78 msnm
- c) 83 msnm

En adición al escenario de aporte actual (A), en el futuro podrían plantearse, eventualmente, escenarios de aporte incrementado al embalse, pero éstos no son considerados en el presente informe.

Adicionalmente, los escenarios de concentración mínima, media y máxima en la entrada se identificarán como 'Mi', 'Me' y 'Ma'.

De la combinación de las distintas cotas, condiciones de aporte y concentraciones en la entrada surgen los escenarios que se identificarán con una letra, representativa de la condición de aporte, un número indicador de la cota del embalse, y el código asociado al valor de la concentración en la entrada. Así, por ejemplo, el escenario A78-Me es el que tiene una condición de aporte A para una cota de embalse de 78 msnm y una concentración media en la entrada.

Como indicadores puntuales, se presentarán datos de concentración de metales en columna de agua y en sedimento para las 9 estaciones mostradas en la figura 3.1.2, en las cuales, en general, se dan valores de alguna significación.

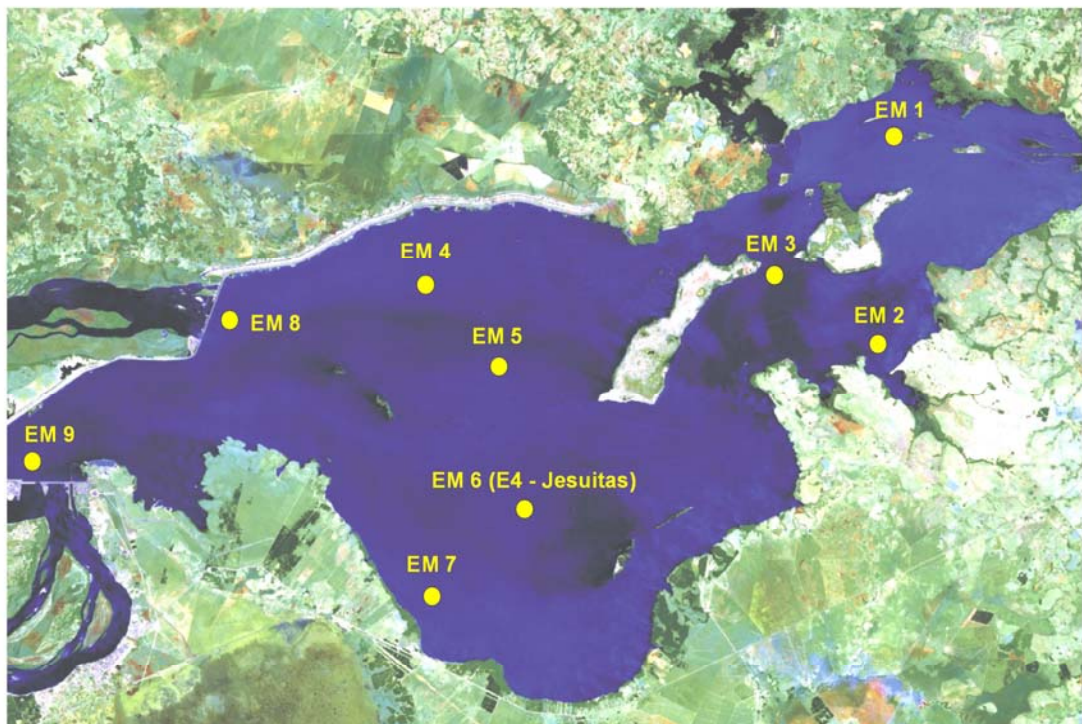


Figura 3.1.2 Serie temporal de caudales erogados por el Brazo Aña-Cuá.

3.2 ELEVACIÓN DE LA COTA DE EMBALSE

3.2.1 Cobre

La tabla 3.2.1 muestra las bandas de flujos máxicos de cobre en columna de agua a la salida para los escenarios A76, A78 y A83, de acuerdo al modelo. Comparando con el escenario de calibración (tabla 2.3.1), se observa que al reducir el caudal por el BAC para cota 76 msnm se produce, además de la lógica disminución del flujo máxico por ese brazo, un leve decrecimiento (alrededor del 5%) del flujo total a la salida. Esto debe estar asociado a las distintas condiciones de sedimentación que genera la redistribución del flujo.

Por otro lado, comparando los escenarios A78 y A83 con el A76, también se observa una disminución del flujo máxico a la salida con el aumento de la cota de embalse: éste cae desde 55% del flujo máxico ingresante para A76, a 50 y 37% para A78 y A83, respectivamente. Esto está asociado al aumento del tiempo de residencia y el consecuente incremento en la sedimentación. El porcentaje que sale por el BP, a su vez, sube del 84% para A76 a 89% para A78 y a 91% para A83. Esto indica que, al elevar la cota, el BP tiende a captar mayor porción del área de flujo entrante.

Las concentraciones medias asociadas a la entrada y las salidas se presentan en la tabla 3.2.2.

Tabla 3.2.1

Rango de flujos máxicos representativos de cobre (g/s) para distintas cotas de embalse.

Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC			Salida BP			Salida Total		
		A76	A78	A83	A76	A78	A83	A76	A78	A83
Mínimo	20	2	1	1	9	9	7	11	10	7
Medio	53	4	3	2	24	23	18	29	27	20
Máximo	140	12	8	5	65	62	48	77	70	52

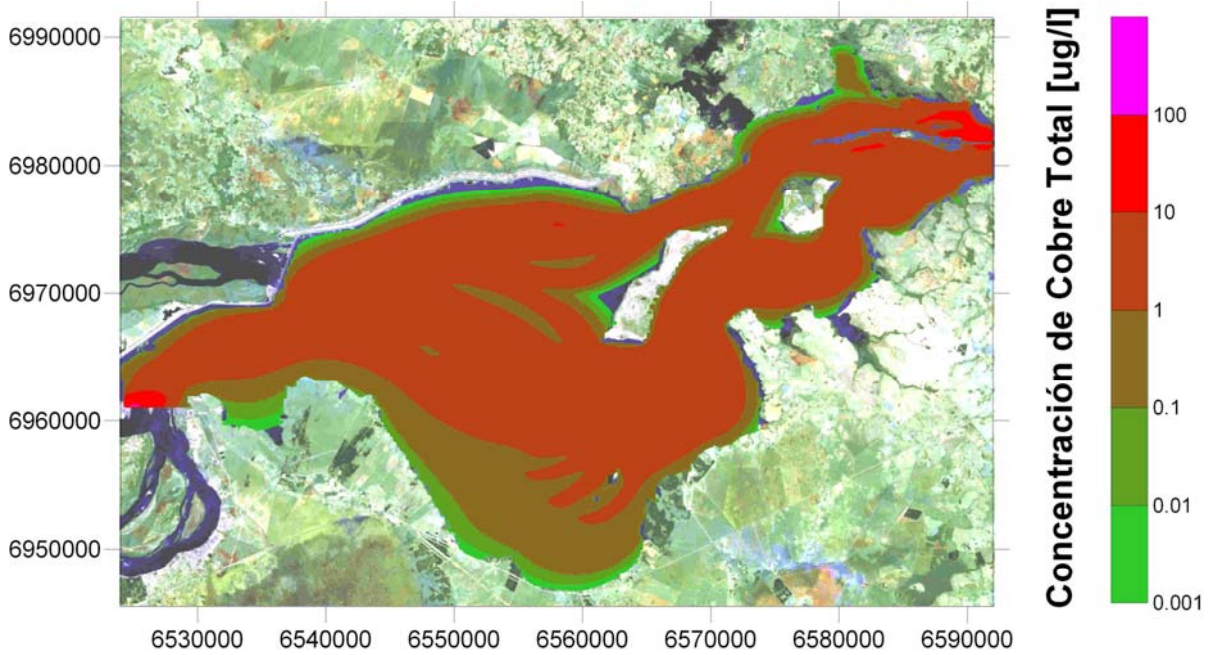
Tabla 3.2.2

Rango de concentraciones representativas de cobre ($\mu\text{g/l}$) para distintas cotas de embalse.

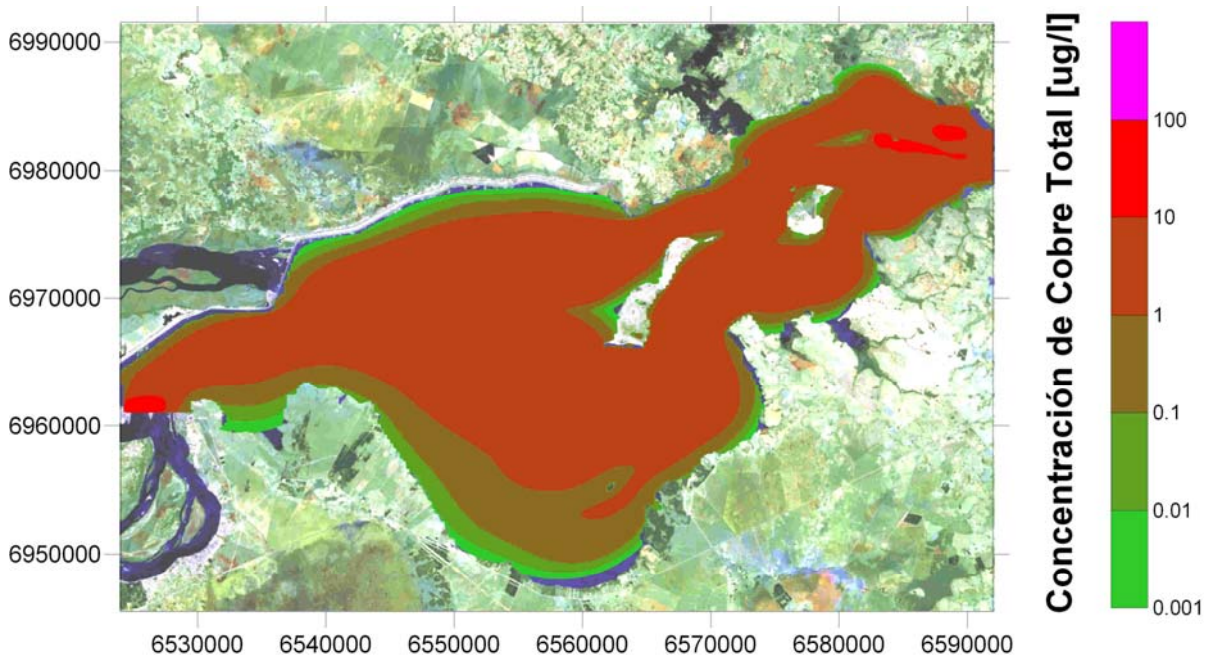
Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC			Salida BP		
		A76	A78	A83	A76	A78	A83
Mínimo	1,33	1,13	0,76	0,45	0,68	0,66	0,51
Medio	3,53	3,00	2,02	1,18	1,81	1,74	1,34
Máximo	9,33	7,92	5,34	3,12	4,79	4,60	3,54

En las figuras 3.2.1a a 3.2.1c se muestran las distribuciones de la concentración de cobre en columna de agua de acuerdo al modelo, para los escenarios de concentración media en la entrada (recordar que los valores extremos se obtienen multiplicando y dividiendo por 2,65), mientras que las figuras 3.2.2a a 3.2.2c presentan las correspondientes concentraciones en fase particulada. Se observa que el aumento de cota

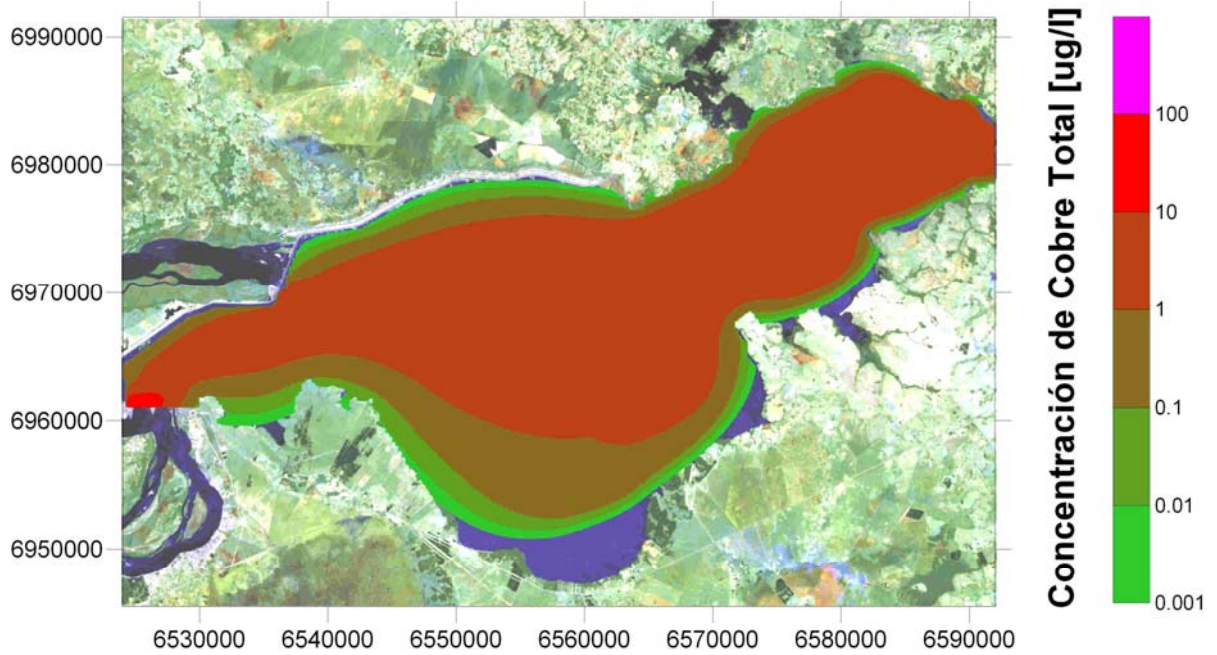
de embalse no provoca cambios muy significativos, mas que la sabida tendencia a la conformación de un corredor central único.



a) Escenario A76-Me

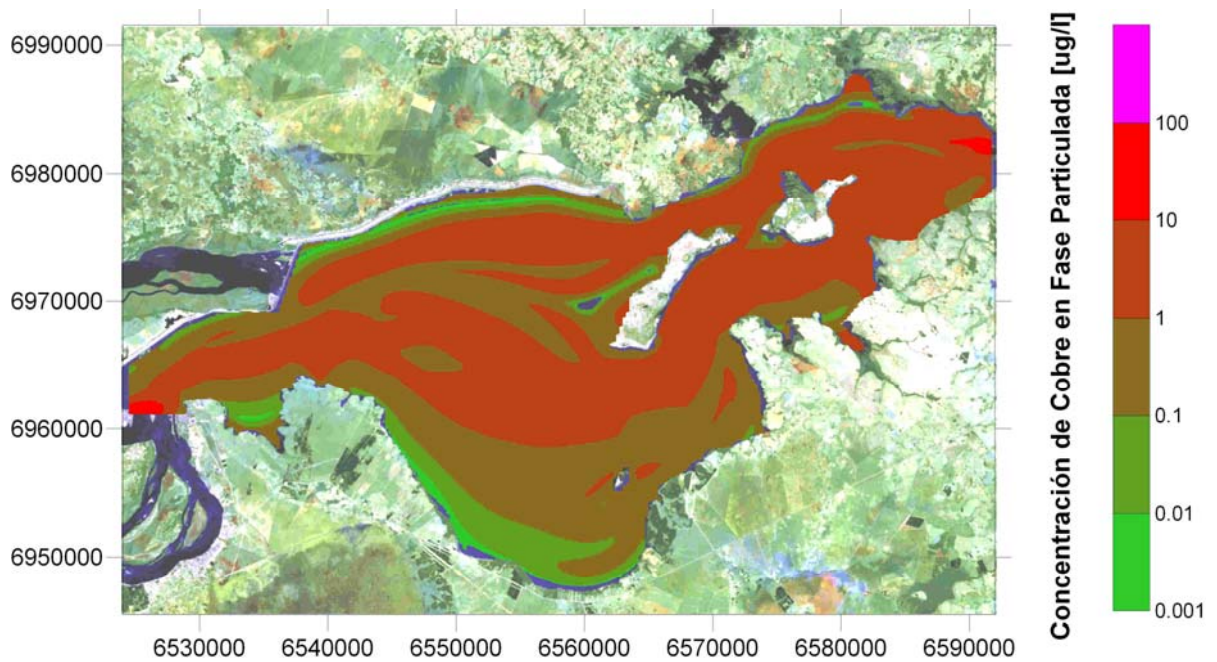


b) Escenario A78-Me

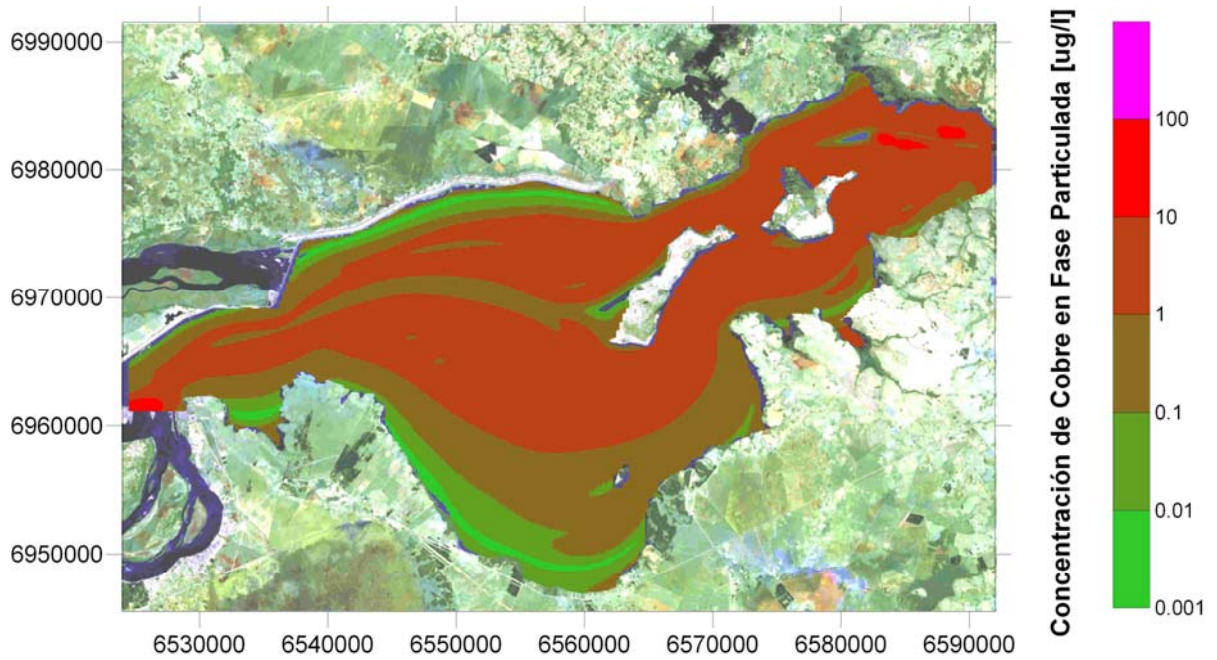


c) Escenario A83-Me

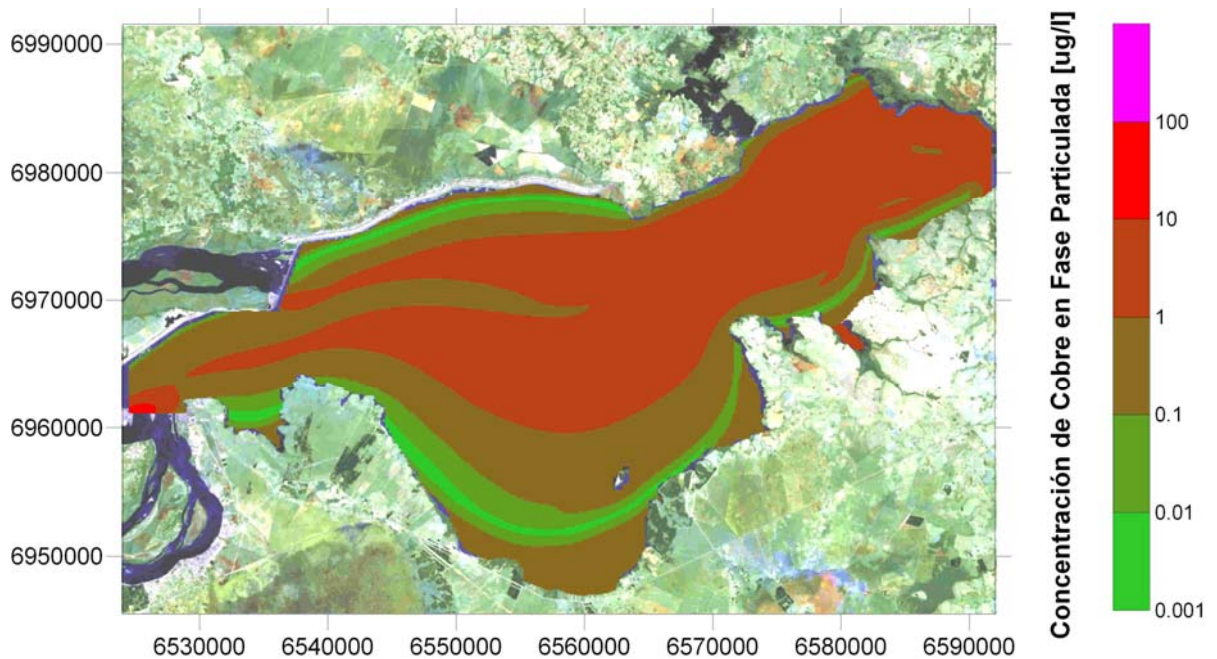
Figura 3.2.1 Distribución de concentración de cobre en columna de agua



a) Escenario A76-Me



b) Escenario A78-Me



c) Escenario A83-Me

Figura 3.2.2 Distribución de concentración de cobre particulado en columna de agua

Las figuras 3.2.3a a 3.2.3c muestran las distribuciones de la concentración de cobre en sedimento para los escenarios de concentración media. Si se compara la figura 3.2.3a,

para el escenario A76, con la figura 2.3.4b, para el escenario de calibración, se observa un aumento de las concentraciones de cobre en sedimento para el primer caso, seguramente como resultado de una menor deposición de sólidos por el efecto de redistribución del flujo. El aumento de nivel de agua genera un aumento del área de las zonas con mayor concentración.

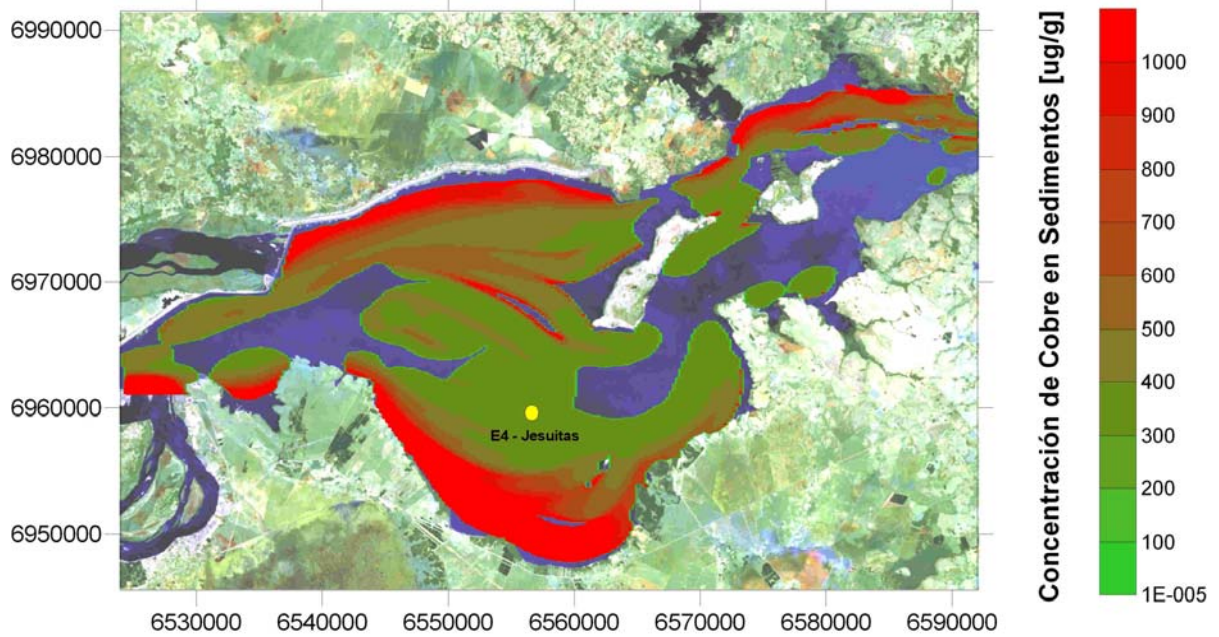
En la tabla 3.2.3 se presentan valores de la concentración de cobre en columna de agua y en sedimento, correspondientes al escenario medio, para las estaciones de seguimiento indicadas en la figura 3.1.2. La estación EM9 (salida del BP) muestra valores significativamente más elevados que el resto. Para concentración en sedimento, le siguen en importancia EM7 y EM1, asociadas a puntos marginales. Se observa que, con el cambio de cota de embalse, no necesariamente se manifiestan tendencias monótonas. Ello está relacionado, al menos en parte, al hecho de que se impone rígidamente el caudal de salida por el BAC.

Tabla 3.2.3

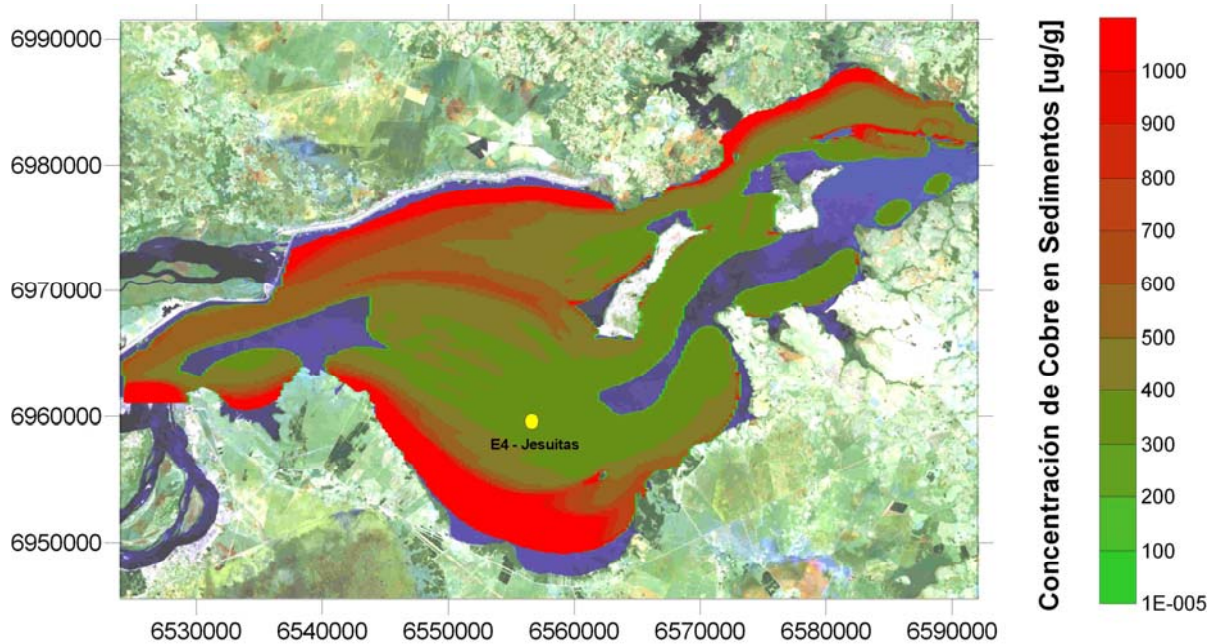
Valores puntuales de concentración de cobre en columna de agua y en sedimento, para distintas cotas de embalse.

Estación	Concentración en columna [$\mu\text{g/l}$]			Concentración en sedimento [$\mu\text{g/g}$]		
	A76	A78	A83	A76	A78	A83
EM 1	3,9	1,0	4,7	915	447	393
EM 2	1,5	1,6	1,4	355	360	379
EM 3	0,6	3,1	3,4	375	367	364
EM 4	2,7	2,5	3,1	455	491	615
EM 5	0,6	2,0	2,0	0	452	437
EM 6	2,6	2,6	1,5	346	364	478
EM 7	0,2	0,2	0,1	1437	2706	5285
EM 8	0,8	0,4	0,2	784	887	1272
EM 9	82,0	72,1	29,5	7328	6924	5039

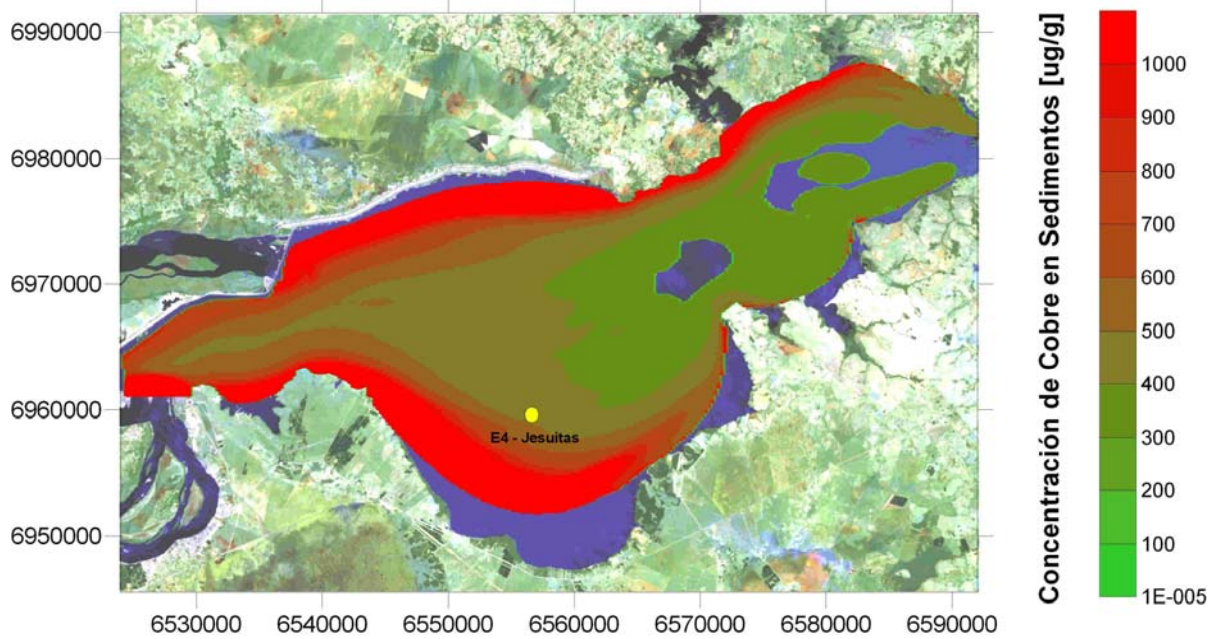
En las figuras 3.2.4a a 3.2.4c se muestran las distribuciones de tasa de sedimentación de cobre para los escenarios medios. Comparando los resultados para A76, figura 3.2.4a, con el escenario de calibración, figura 2.3.5, no se observan cambios muy significativos como producto de la redistribución del flujo. Las masas acumuladas anuales de cobre en el embalse, correspondientes a estos escenarios, se muestran en la tabla 3.2.4 y en la figura 3.2.5. Se observa un incremento monótono.



a) Escenario A76-Me

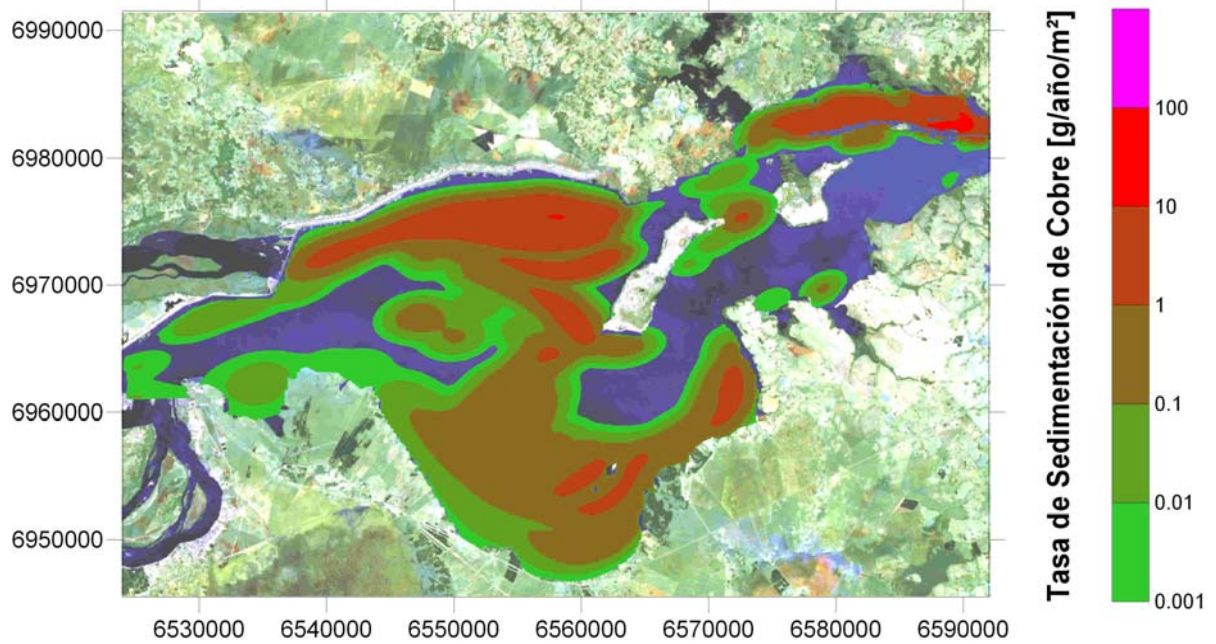


b) Escenario A78-Me

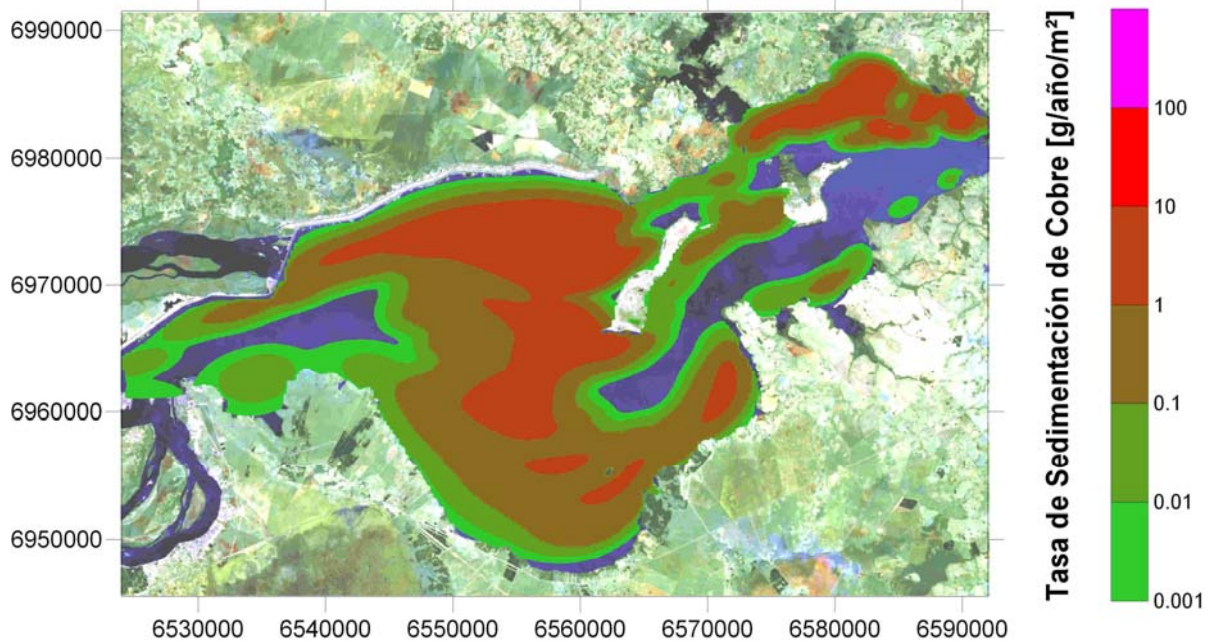


c) Escenario A83-Me

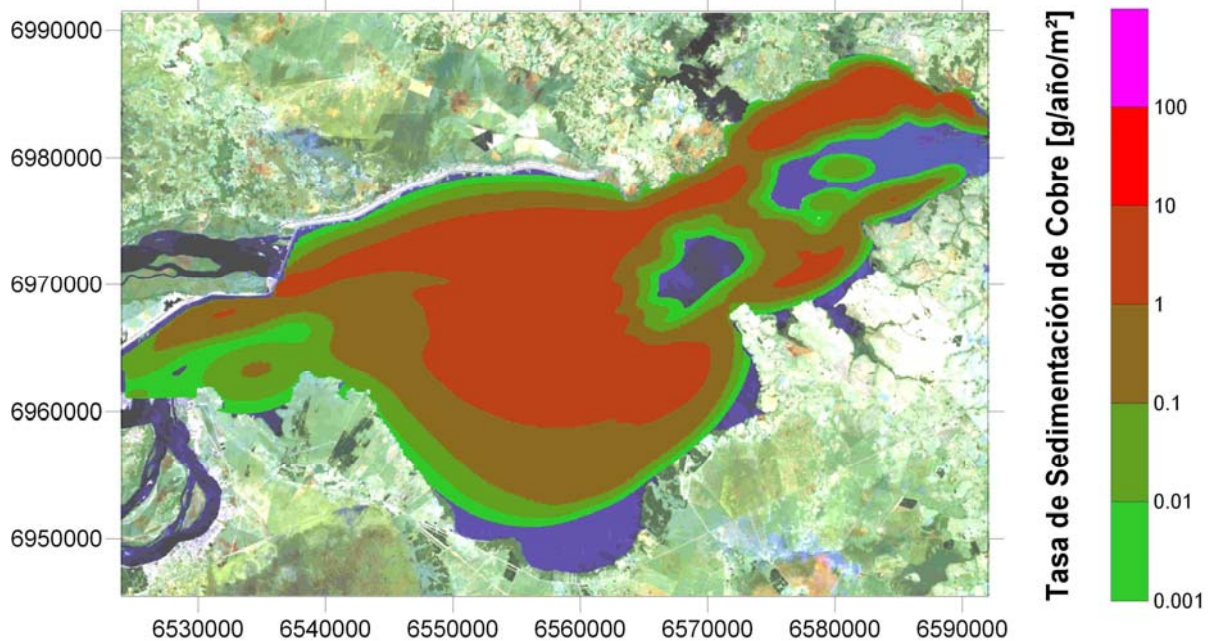
Figura 3.2.3 Distribución de concentración de cobre en sedimento



a) Escenario A76-Me



b) Escenario A78-Me



c) Escenario A83-Me

Figura 3.2.4 Distribución de tasa de sedimentación de cobre

Tabla 3.2.4

Rango de tasas de sedimentación total de cobre en el embalse para distintas cotas de embalse

Valor	Sedimentación (ton/año)		
	A76	A78	A83
Mínimo	239	264	393
Medio	633	699	1038
Máximo	1674	1848	2747

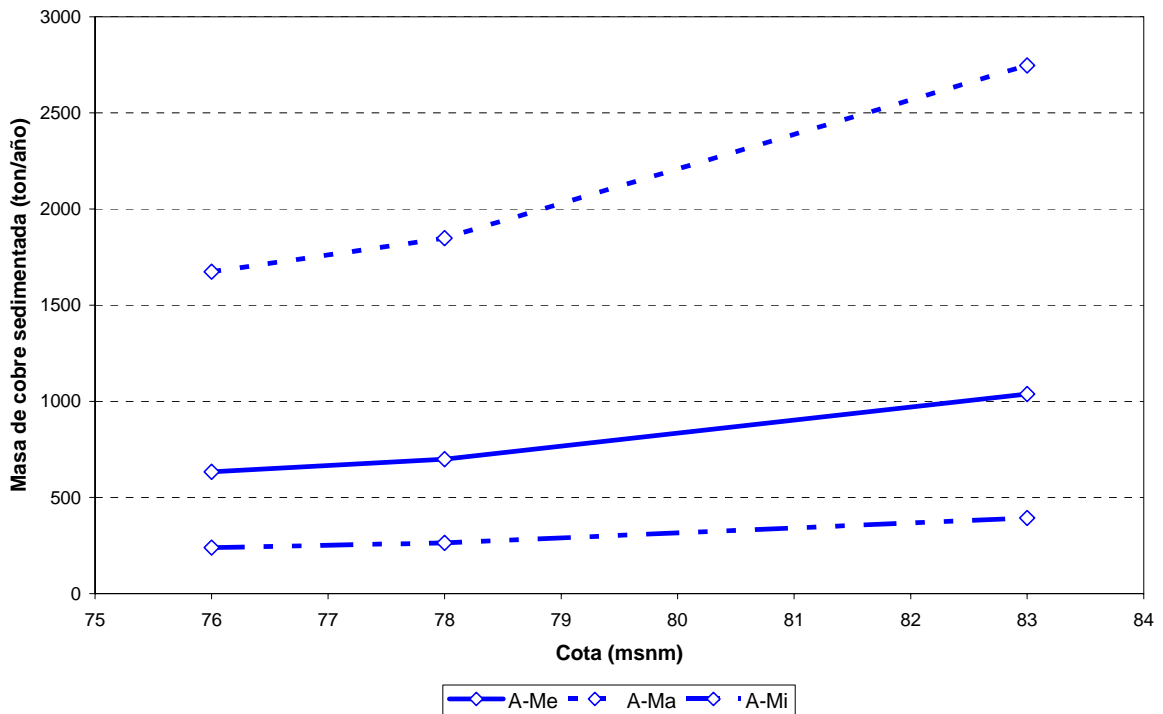
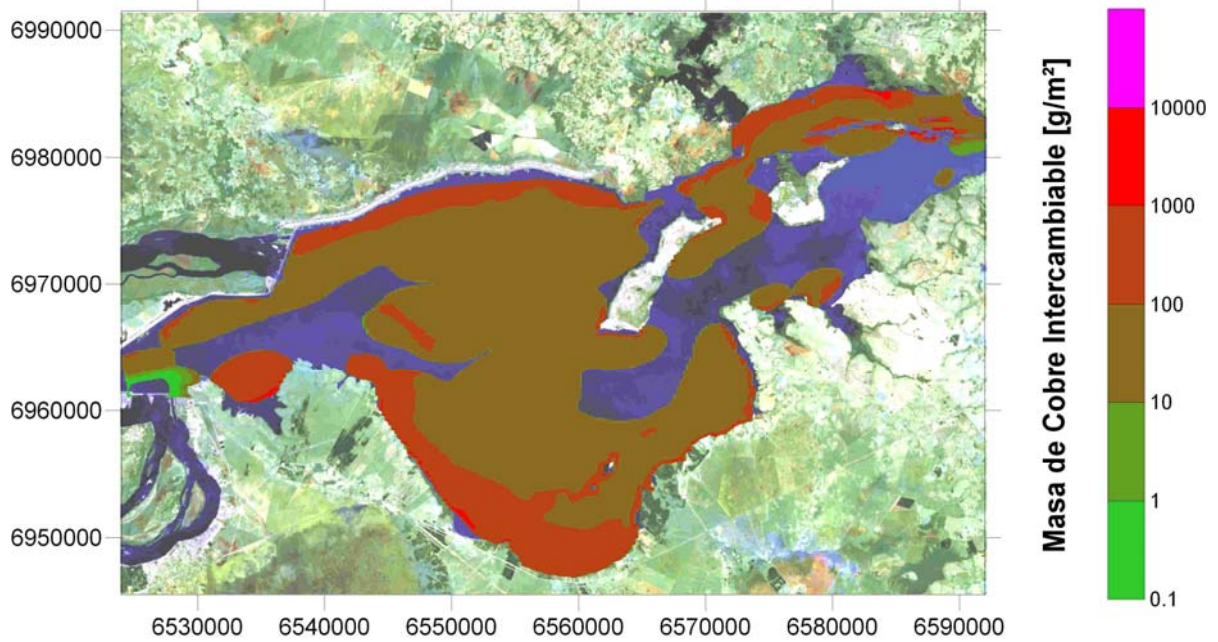
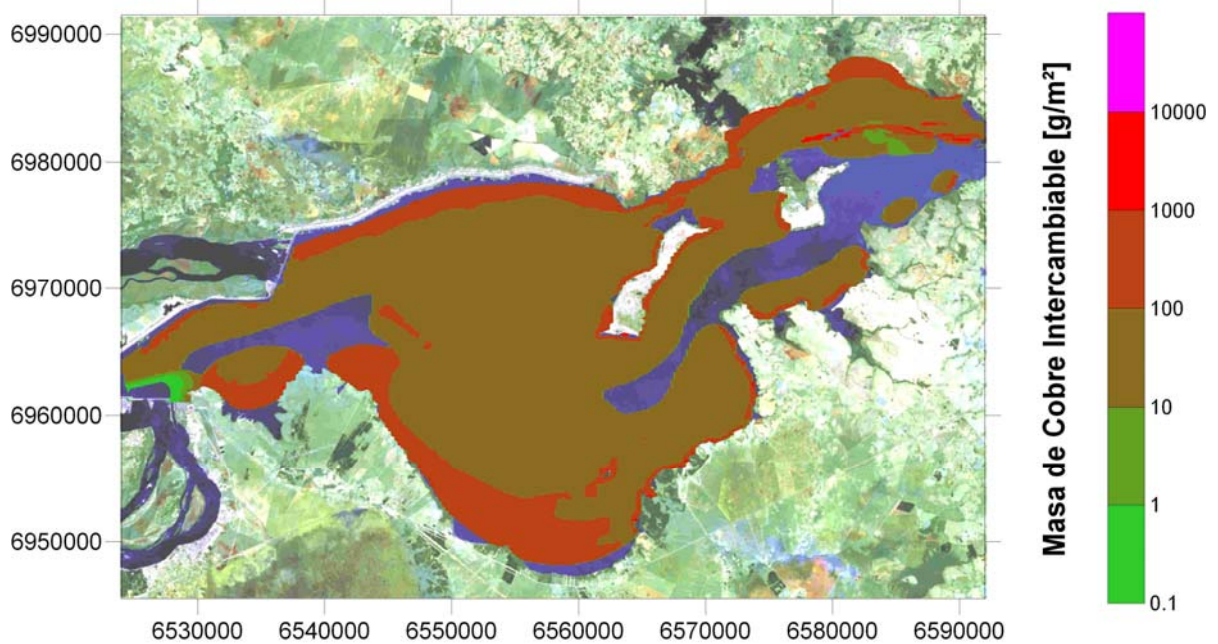


Figura 3.2.5 Masa de cobre sedimentada en el embalse para el escenario A

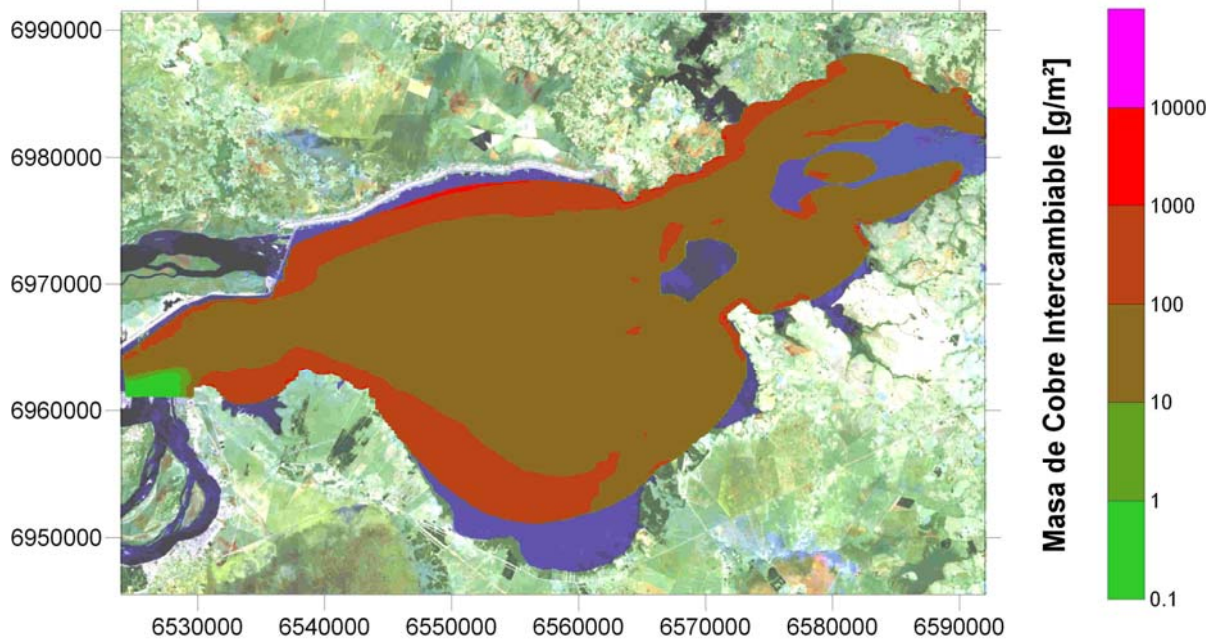
Las distribuciones de masa intercambiable se muestran en las figuras 3.2.6a a 3.2.6c para el escenario de concentración media en la entrada, mientras que la tabla 3.2.5 y en la figura 3.2.7 se muestran los valores de masa total intercambiable. También para este parámetro se observa un crecimiento monótono.



a) Escenario A76-Me



b) Escenario A78-Me



c) Escenario A83-Me

Figura 3.2.6 Distribución de masa de cobre sedimentada intercambiable

Tabla 3.2.5

Rango de valores de masa total de cobre intercambiable en el embalse para distintas cotas de embalse

Valor	Masa (miles de ton)		
	A76	A78	A83
Mínimo	33	35	40
Medio	87	93	105
Máximo	230	247	278

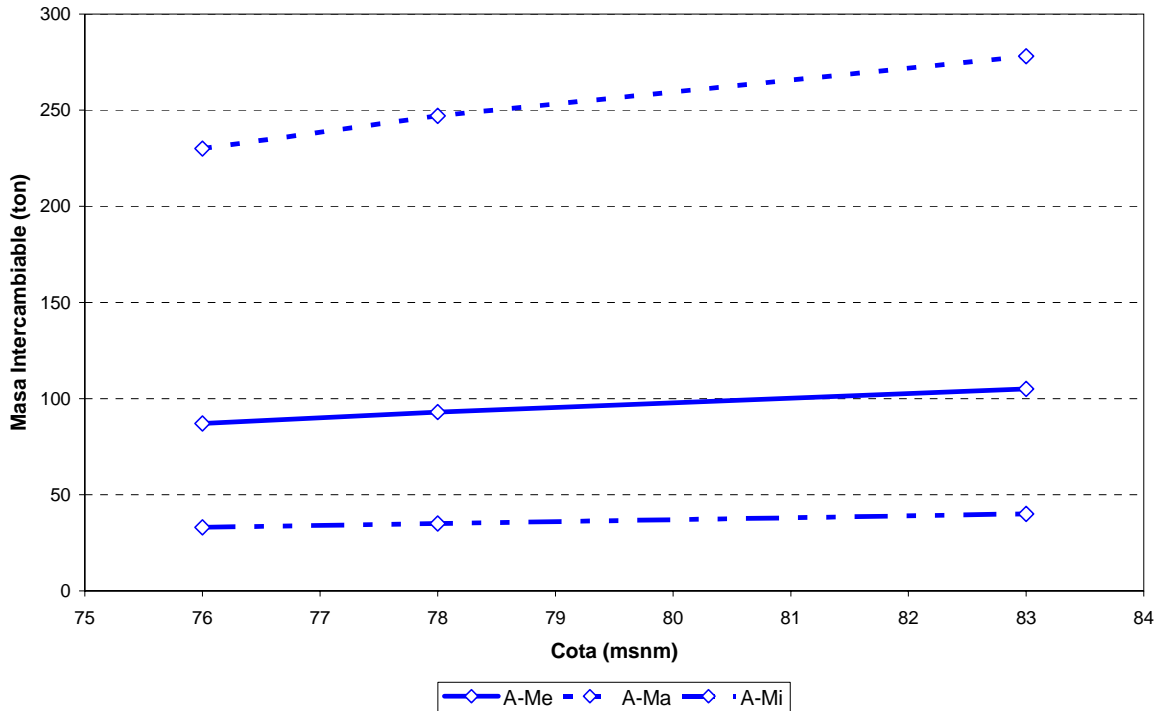


Figura 3.2.7 Masa de cobre intercambiable en sedimento para el escenario A

3.2.2 Plomo

En la tabla 3.2.6 se muestran las bandas de flujos másicos de plomo en columna de agua a la salida para los escenarios A76, A78 y A83, de acuerdo al modelo. De la comparación con la tabla 2.3.6, surge que la disminución del flujo másico total a la salida, para cota 76 msnm, es ahora mucho más significativa (alrededor del 20%) que para el cobre, lo cual debe estar ligado al mayor contenido relativo de plomo en dilución. La disminución del flujo másico saliente con el aumento de la cota de embalse es leve: pasa del 73% del flujo másico ingresante para A76, a 72 y 71% para A78 y A83, respectivamente. El porcentaje que sale por el BP, a su vez, apenas sube desde el 82% para A76 hasta 83% para A83. Las concentraciones medias asociadas se presentan en la tabla 3.2.7.

Tabla 3.2.6

Rango de flujos másicos representativos de plomo (g/s) para escenarios de aumento de cota de embalse.

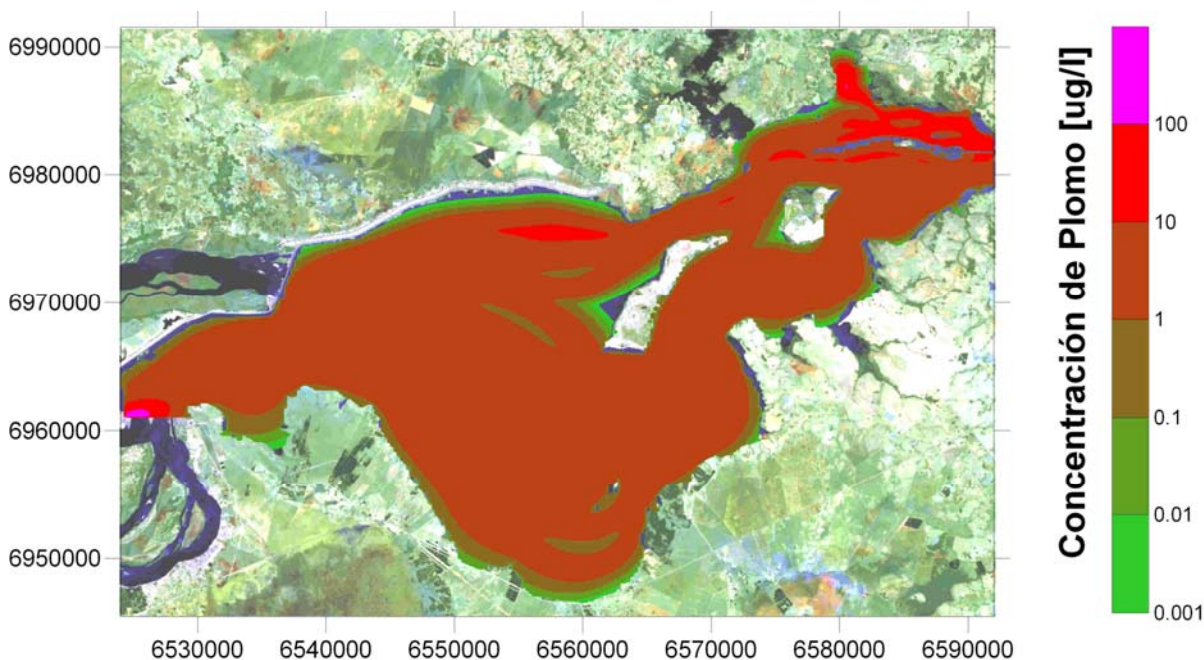
Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC			Salida BP			Salida Total		
		A76	A78	A83	A76	A78	A83	A76	A78	A83
Mínimo	18	3	2	2	11	11	11	14	13	13
Medio	60	9	8	7	36	36	35	45	43	42
Máximo	200	27	26	25	119	119	117	146	145	142

Tabla 3.2.7

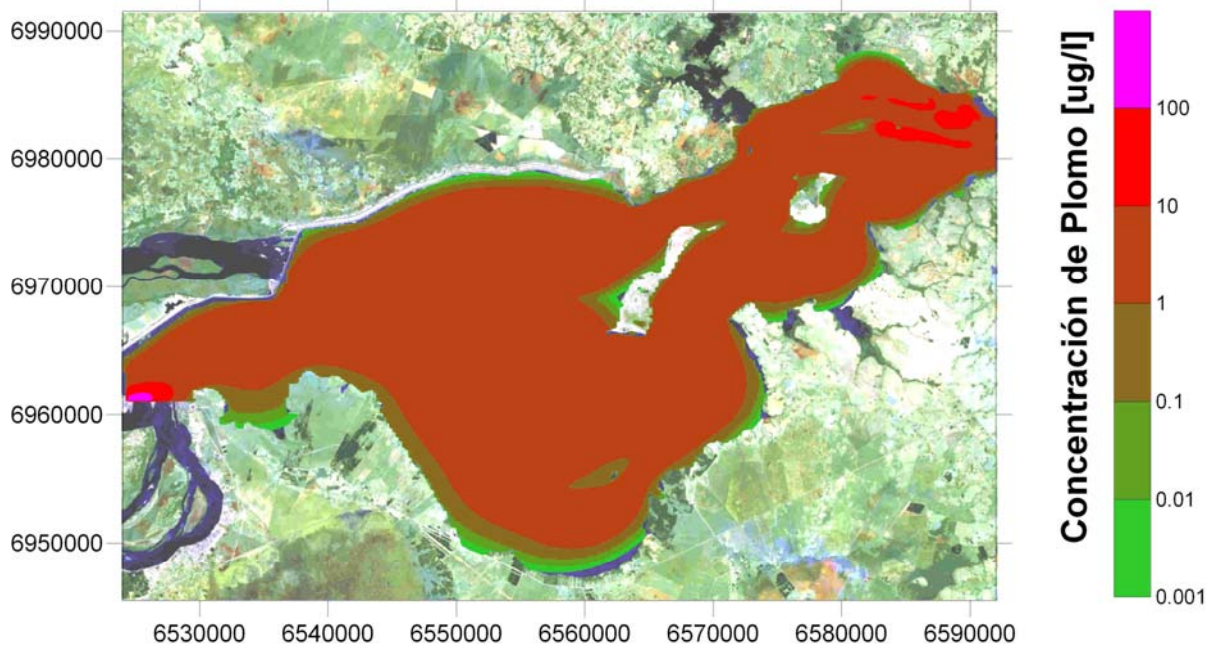
Rango de concentraciones representativas de plomo ($\mu\text{g/l}$) para escenarios de aumento de cota de embalse.

Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC			Salida BP		
		A76	A78	A83	A76	A78	A83
Mínimo	1,20	2,00	1,58	1,49	0,81	0,79	0,78
Medio	4,00	6,00	5,28	4,95	2,68	2,63	2,60
Máximo	13,33	18,00	17,60	16,50	8,81	8,78	8,66

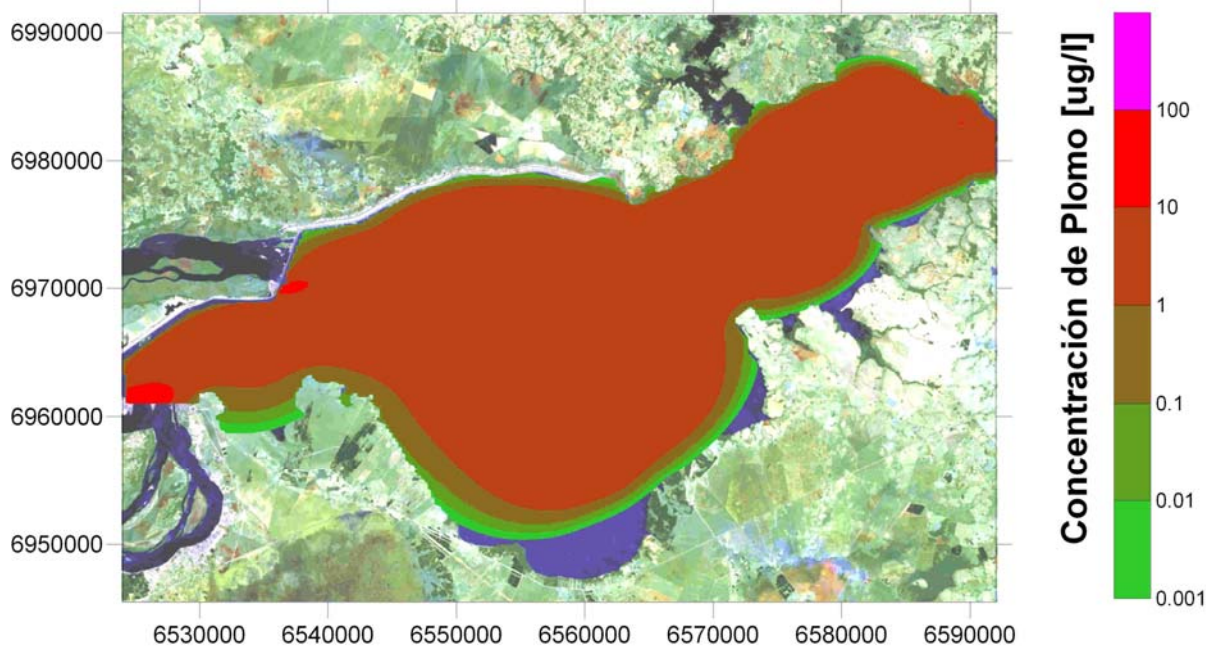
Las figuras 3.2.8a a 3.2.8c muestran las distribuciones de la concentración de plomo en columna de agua de acuerdo al modelo, para los escenarios de concentración media en la entrada (los valores extremos se obtienen multiplicando y dividiendo por 3,33). Por su parte, las figuras 3.2.9a a 3.2.9c presentan las correspondientes concentraciones en fase particulada.



a) Escenario A76-Me

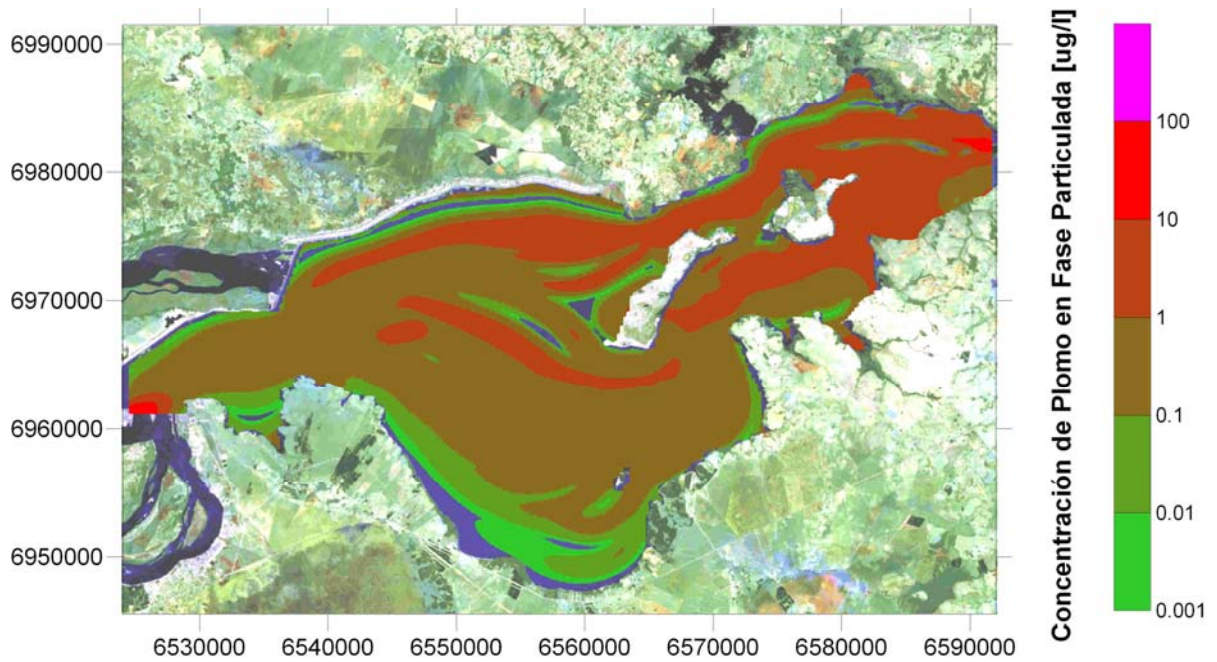


b) Escenario A78-Me

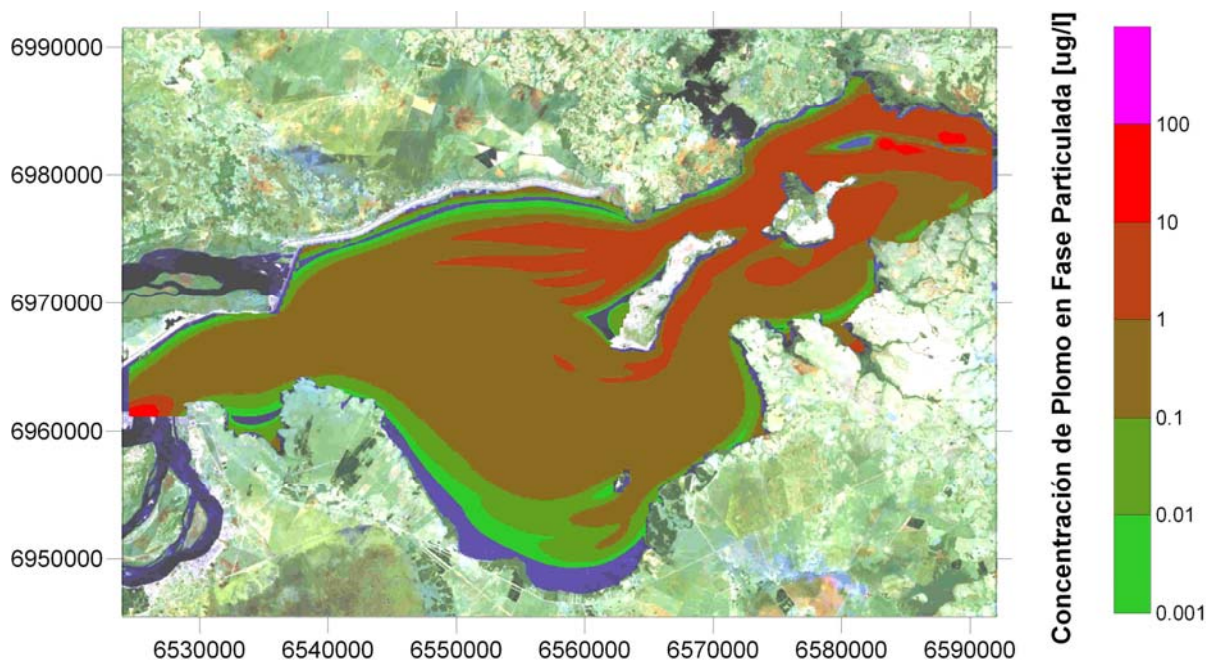


c) Escenario A83-Me

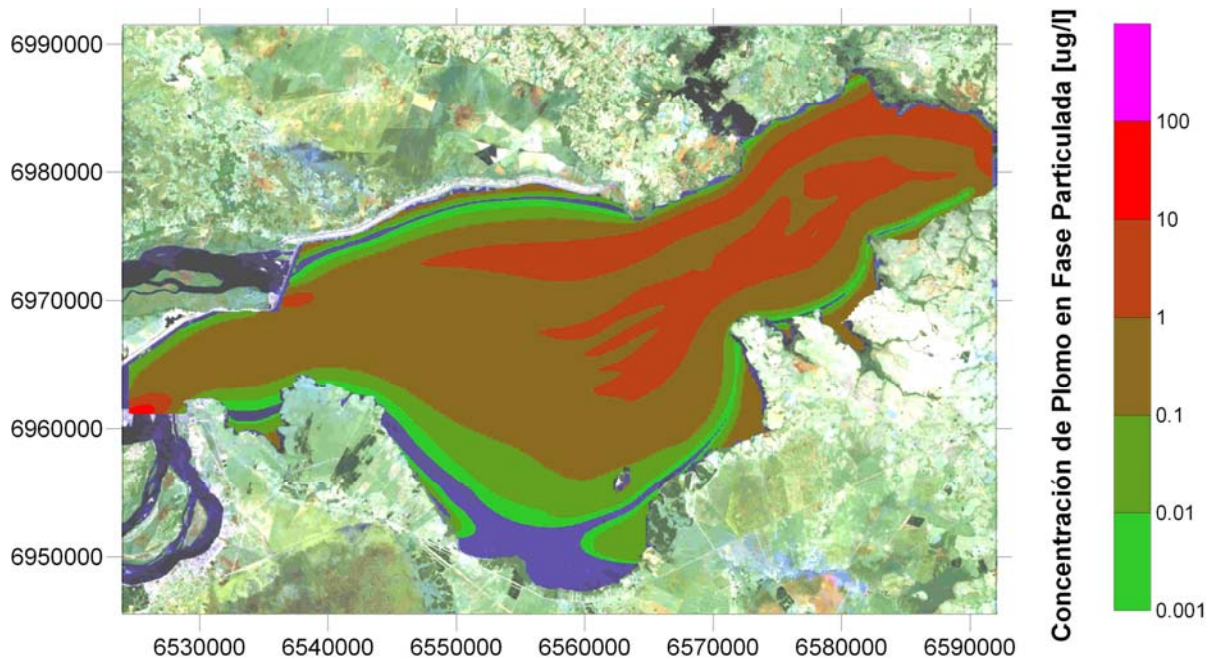
Figura 3.2.8 Distribución de concentración de plomo en columna de agua



a) Escenario A76-Me



b) Escenario A78-Me



c) Escenario A83-Me

Figura 3.2.9 Distribución de concentración de plomo particulado en columna de agua

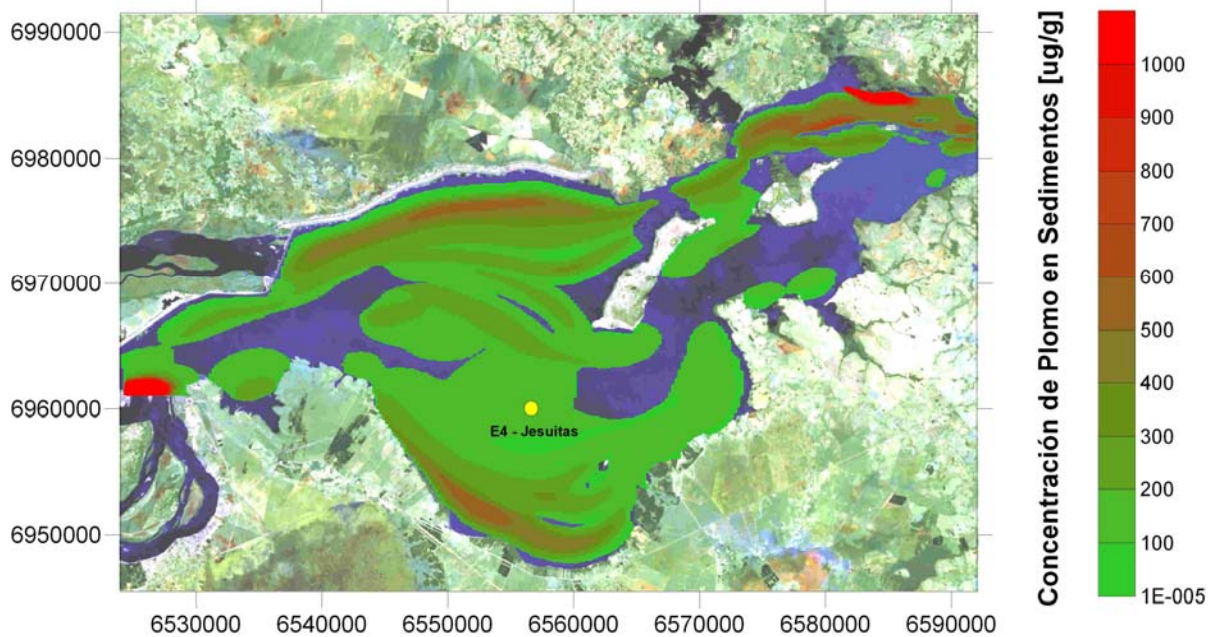
En las figuras 3.2.10a a 3.2.10c se muestran las distribuciones de la concentración de plomo en sedimento para el escenario de concentración media en la entrada, mientras que la tabla 3.2.8 presenta la concentración media de plomo en columna de agua y en sedimento para las estaciones de seguimiento.

Las figuras 3.2.11a a 3.2.11c muestran las distribuciones de tasa de sedimentación de plomo. Las masas acumuladas anuales de plomo en el embalse se muestran en la tabla 3.2.9 y en la figura 3.2.12.

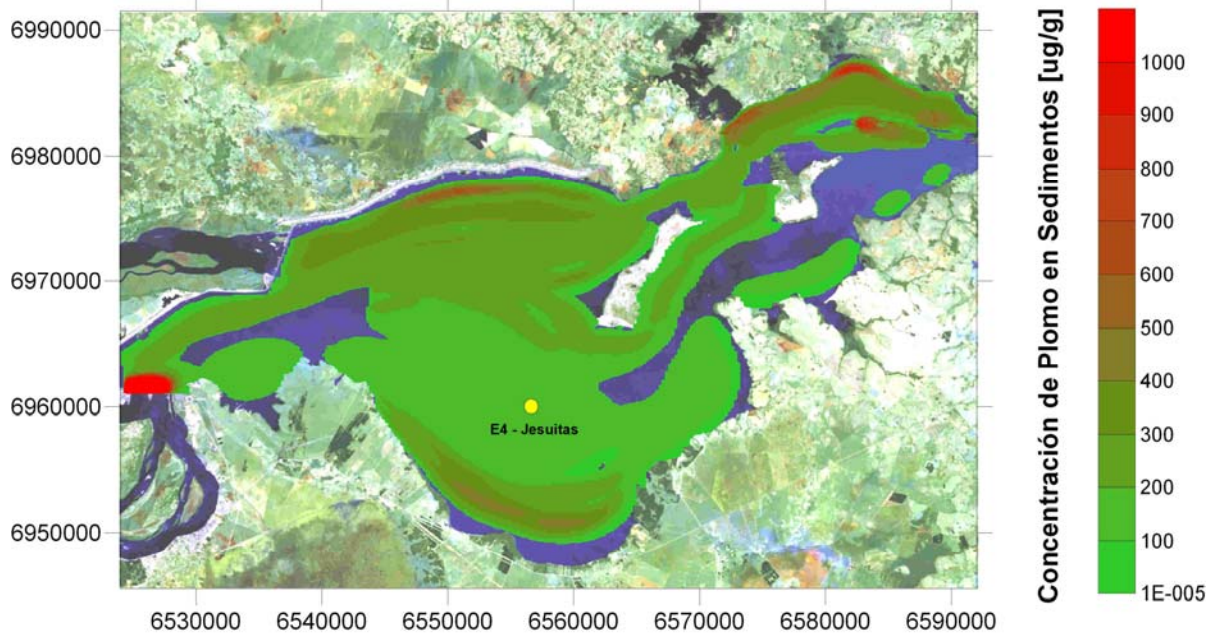
Tabla 3.2.8

Valores puntuales de concentración de plomo en columna de agua y en sedimento, para distintas cotas de embalse.

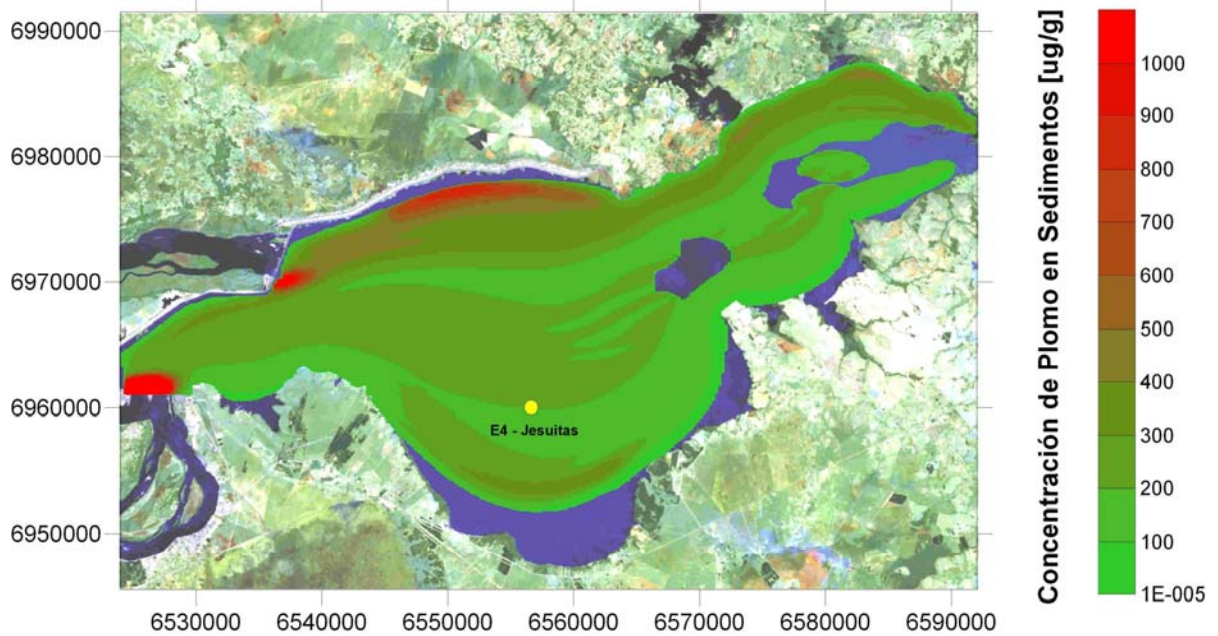
Estación	Concentración en columna [$\mu\text{g/l}$]			Concentración en sedimento [$\mu\text{g/g}$]		
	A76	A78	A83	A76	A78	A83
EM 1	10,0	1,2	5,3	700	105	240
EM 2	1,7	1,9	1,8	119	128	136
EM 3	0,7	3,6	3,9	68	191	196
EM 4	3,9	3,9	5,9	242	257	389
EM 5	0,8	3,0	2,9	0	204	195
EM 6	3,0	3,1	2,4	167	177	188
EM 7	1,6	1,7	0,7	280	359	216
EM 8	2,4	1,6	1,6	259	215	266
EM 9	135	145	83	6294	6962	5159



a) Escenario A76-Me

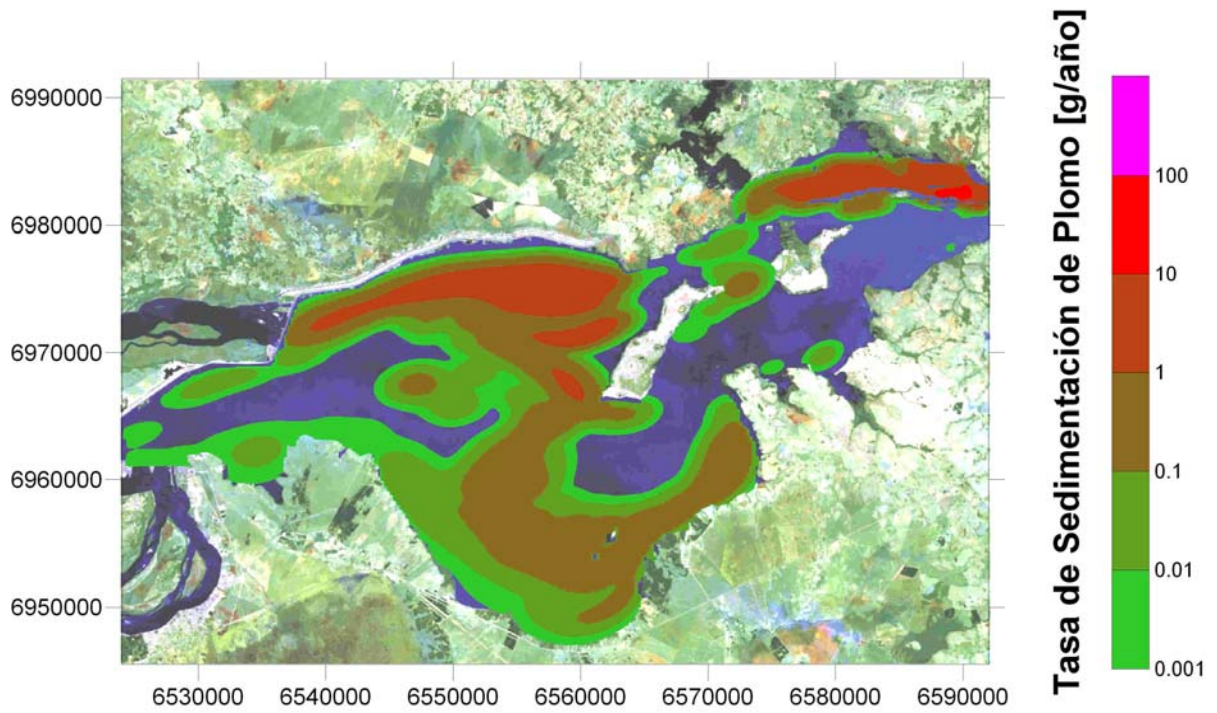


b) Escenario A78-Me

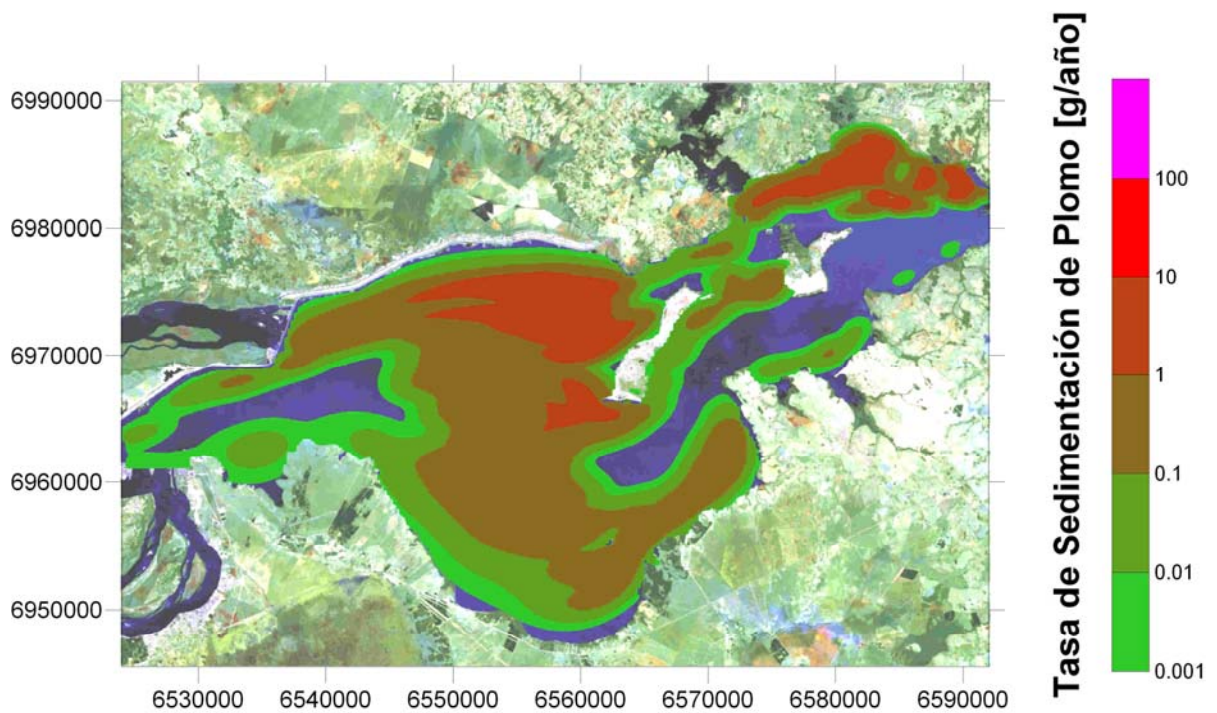


c) Escenario A83-Me

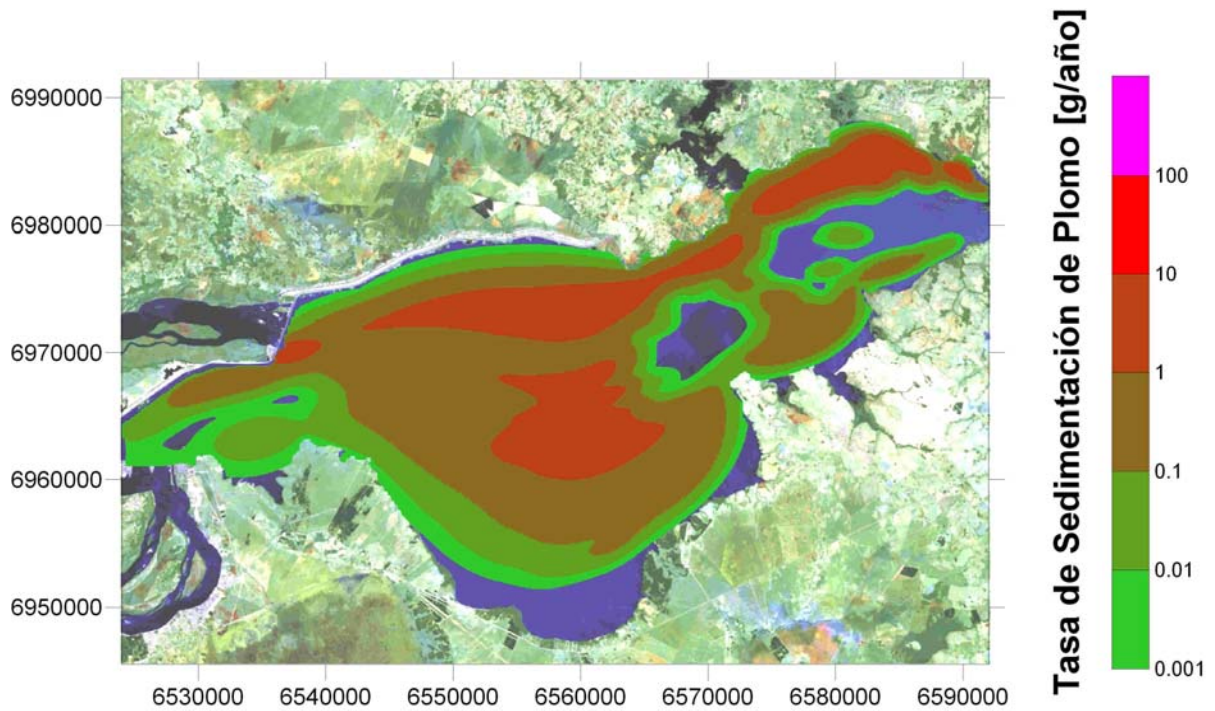
Figura 3.2.10 Distribución de concentración de plomo en sedimento



a) Escenario A76-Me



b) Escenario A78-Me



c) Escenario A83-Me

Figura 3.2.11 Distribución de tasa de sedimentación de plomo

Tabla 3.2.9

Rango de tasas de sedimentación total de plomo en el embalse para los escenarios de aumento de cota de embalse

Valor	Sedimentación (ton/año)		
	A76	A78	A83
Mínimo	114	120	168
Medio	380	400	561
Máximo	1265	1334	1871

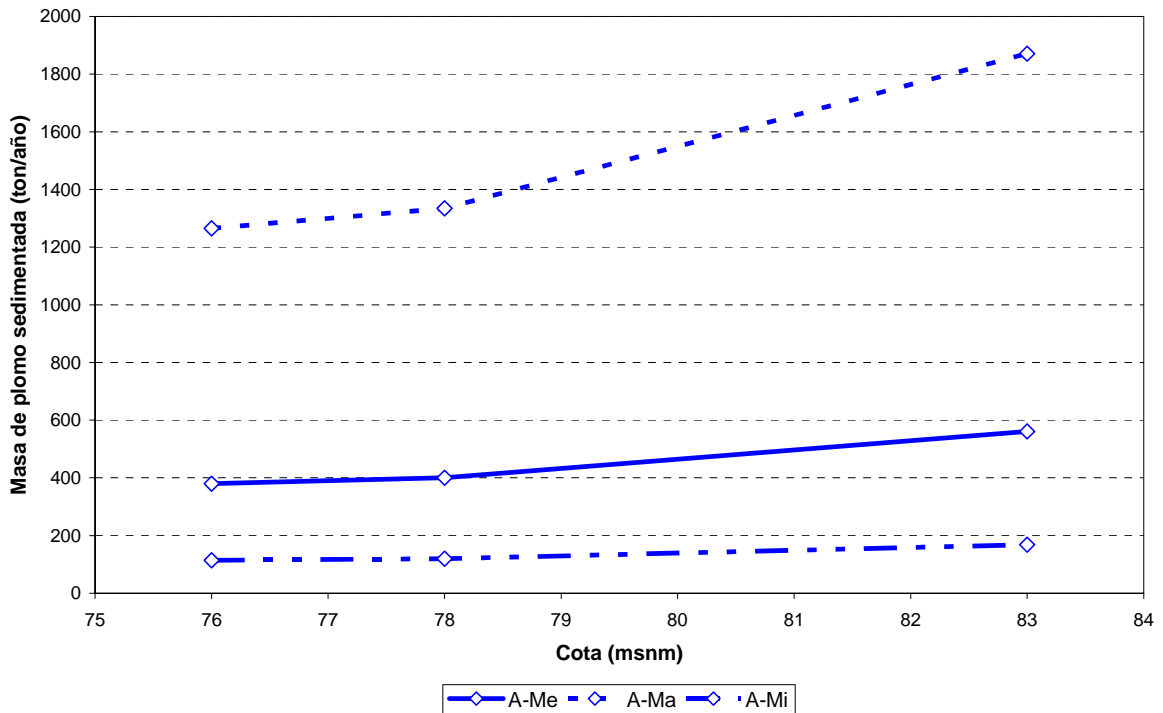
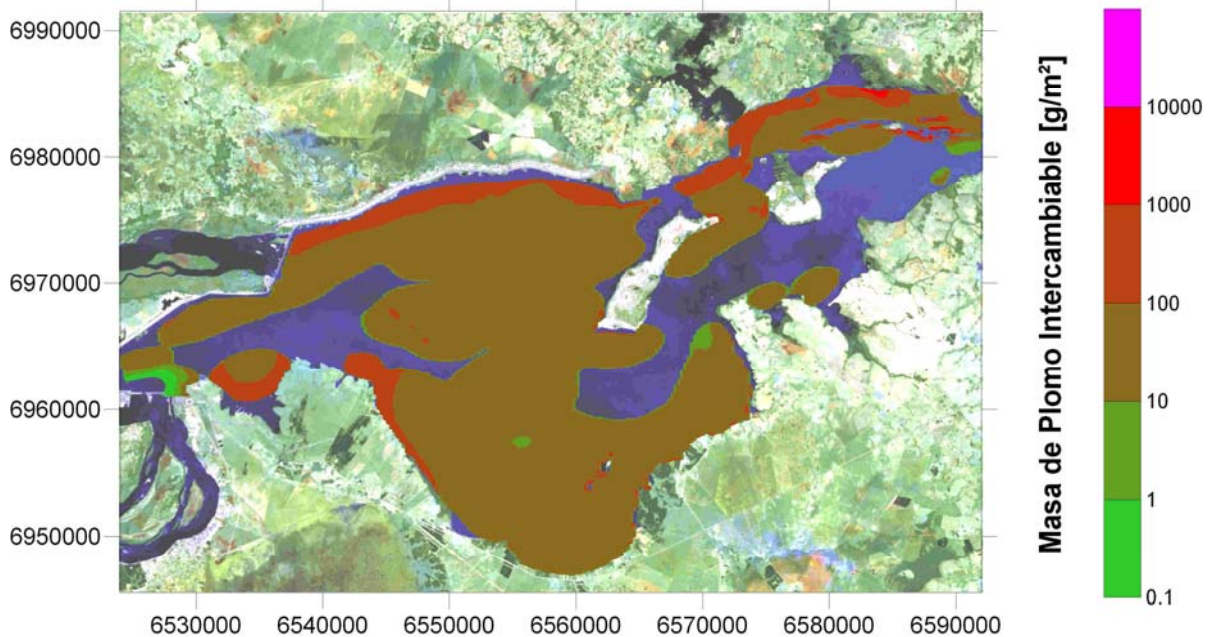
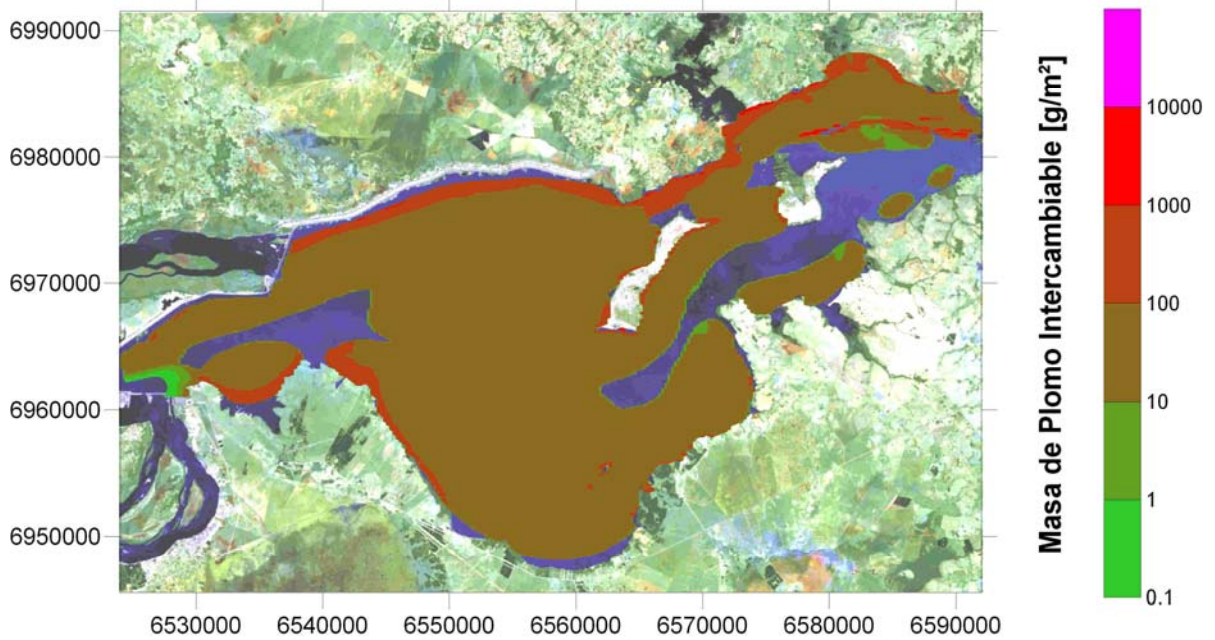


Figura 3.2.12 Masa de plomo sedimentada en el embalse para el escenario A

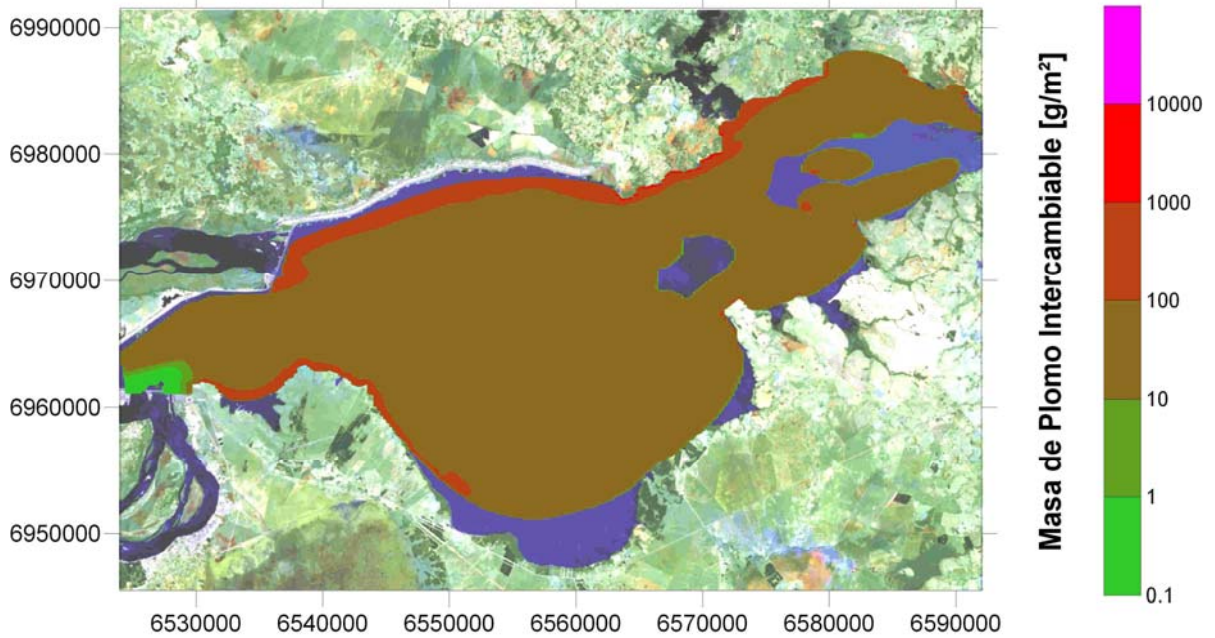
Las figuras 3.2.13a a 3.2.13c muestran las distribuciones de masa intercambiable para el escenario de concentración media en la entrada, mientras que en la tabla 3.2.10 y la figura 3.2.14 se presentan los valores de masa total intercambiable.



a) Escenario A76-Me



b) Escenario A78-Me



c) Escenario A83-Me

Figura 3.2.13 Distribución de masa de plomo sedimentada intercambiable

Tabla 3.2.10

Rango de valores de masa total de plomo intercambiable en el embalse para los escenarios de aumento de cota de embalse

Valor	Masa (miles de ton)		
	A76	A78	A83
Mínimo	14	16	16
Medio	47	52	53
Máximo	156	173	176

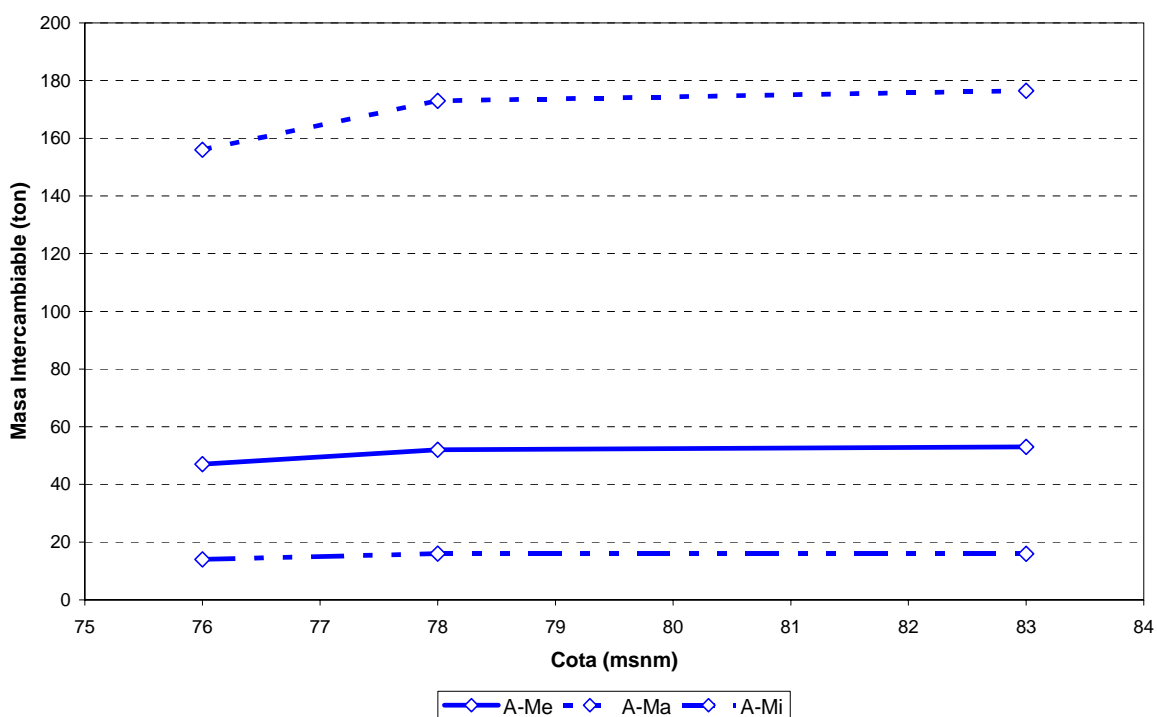


Figura 3.2.14 Masa de plomo intercambiable en sedimento para el escenario A

3.2.3 Cromo

La tabla 3.2.11 muestra las bandas de flujos máxicos de cromo en columna de agua a la salida para los escenarios A76, A78 y A83, de acuerdo al modelo. Al comparar con la tabla 2.3.11, se observa que, para cota 76 msnm, la disminución del flujo máxico total a la salida es del mismo orden que para el cobre (alrededor del 7%). Al aumentar la cota del embalse, el flujo máxico saliente pasa del 55% del flujo máxico ingresante para A76, a 47 y 31% para A78 y A83, respectivamente. El porcentaje que sale por el BP sube desde el 87% para A76 a 91% para A78 y 94% para A83. Las concentraciones medias asociadas se presentan en la tabla 3.2.12.

Tabla 3.2.11

Rango de flujos máxicos representativos de cromo (g/s) para escenarios de aumento de cota de embalse.

Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC			Salida BP			Salida Total		
		A76	A78	A83	A76	A78	A83	A76	A78	A83
Mínimo	14	1	1	0	6	6	4	7	6	4
Medio	39	3	1	1	17	15	10	20	17	11
Máximo	110	7	4	2	48	43	29	55	47	31

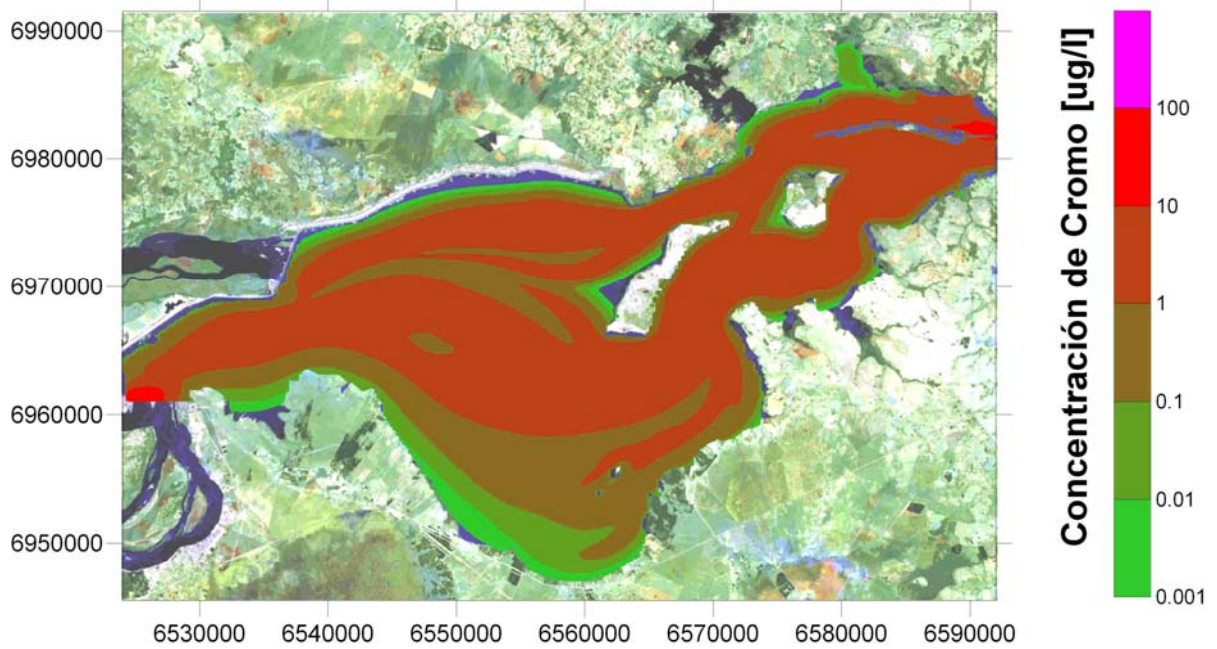
Tabla 3.2.12

Rango de concentraciones representativas de cromo ($\mu\text{g/l}$) para escenarios de aumento de cota de embalse.

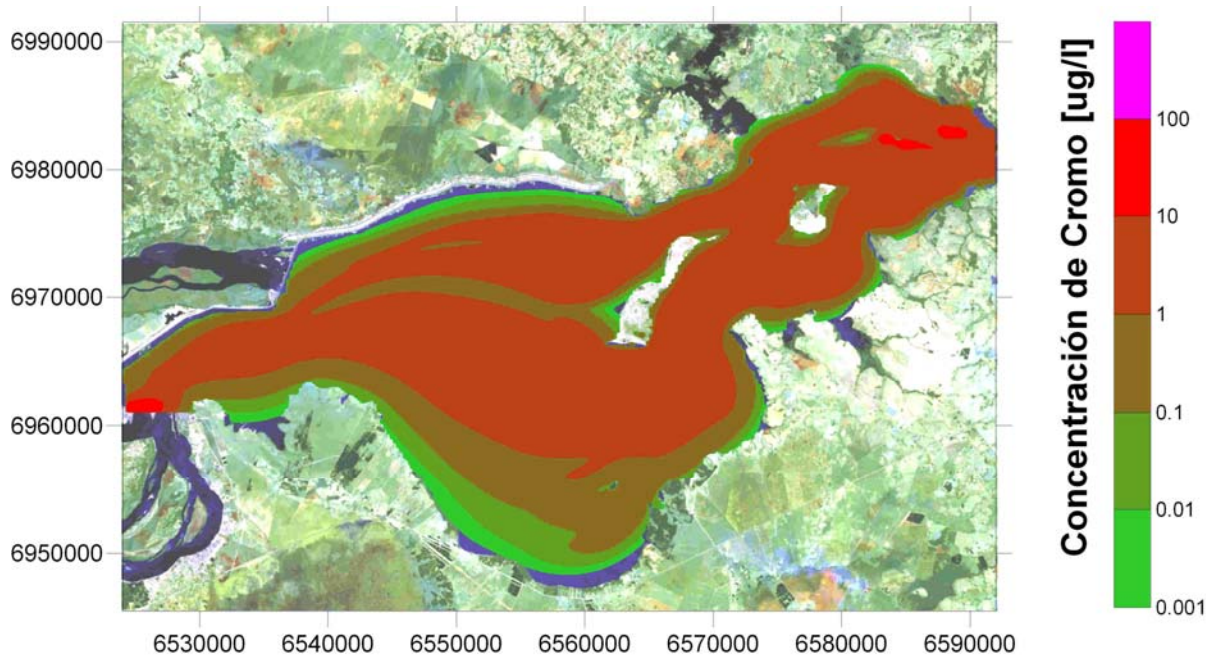
Valor	Entrada Candelaria	Salida BAC			Salida BP		
		A76	A78	A83	A76	A78	A83
Mínimo	0,93	0,61	0,36	0,17	0,45	0,41	0,27
Medio	2,62	1,71	1,00	0,46	1,27	1,14	0,76
Máximo	7,33	4,79	2,79	1,30	3,55	3,21	2,14

En las figuras 3.2.15a a 3.2.15c se muestran las distribuciones de la concentración de cromo en columna de agua de acuerdo al modelo, para los escenarios de concentración media en la entrada (los valores extremos se obtienen multiplicando y dividiendo por 2,80), mientras que las figuras 3.2.16a a 3.2.16c presentan las correspondientes concentraciones en fase particulada.

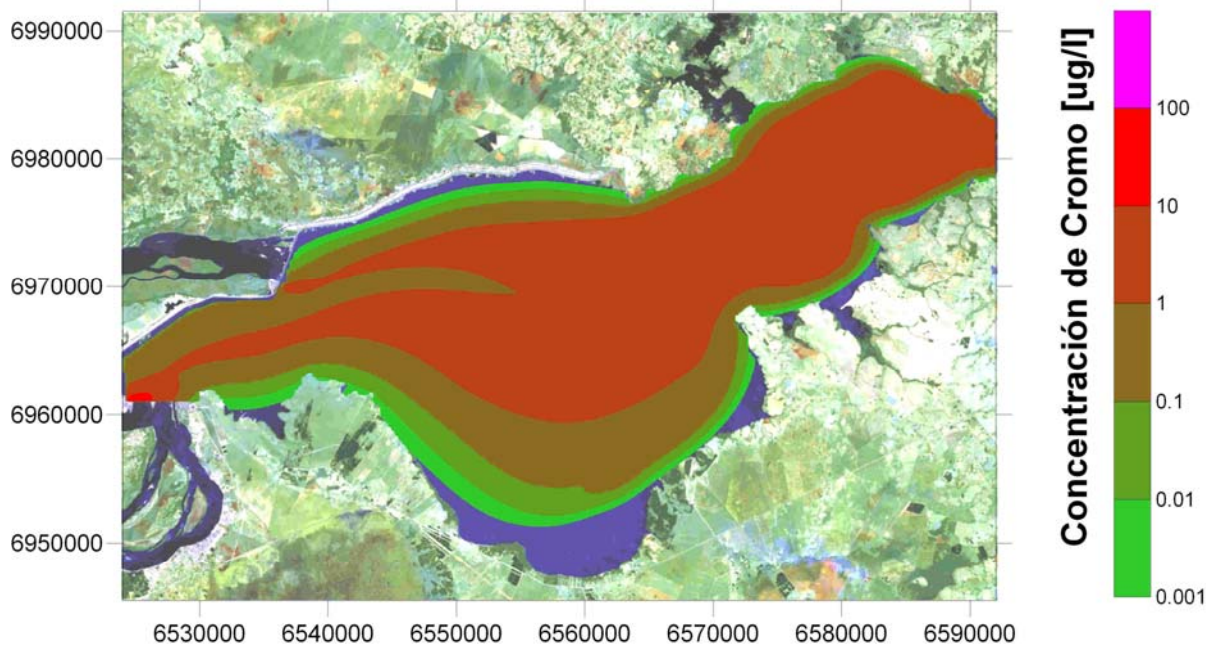
Las figuras 3.2.17a a 3.2.17c muestran las distribuciones de la concentración de cromo en sedimento para los escenarios de concentración media en la entrada. En la tabla 3.2.13 se presenta la concentración media de cromo en columna de agua y en sedimento para las estaciones de seguimiento.



a) Escenario A76-Me

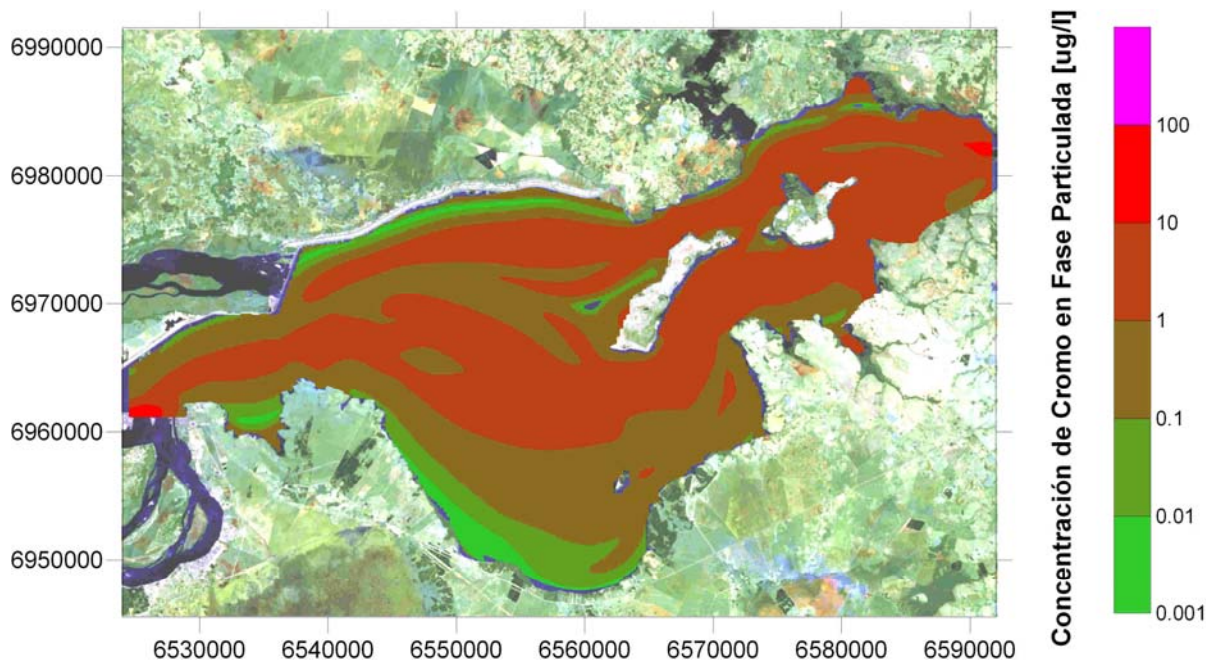


b) Escenario A78-Me

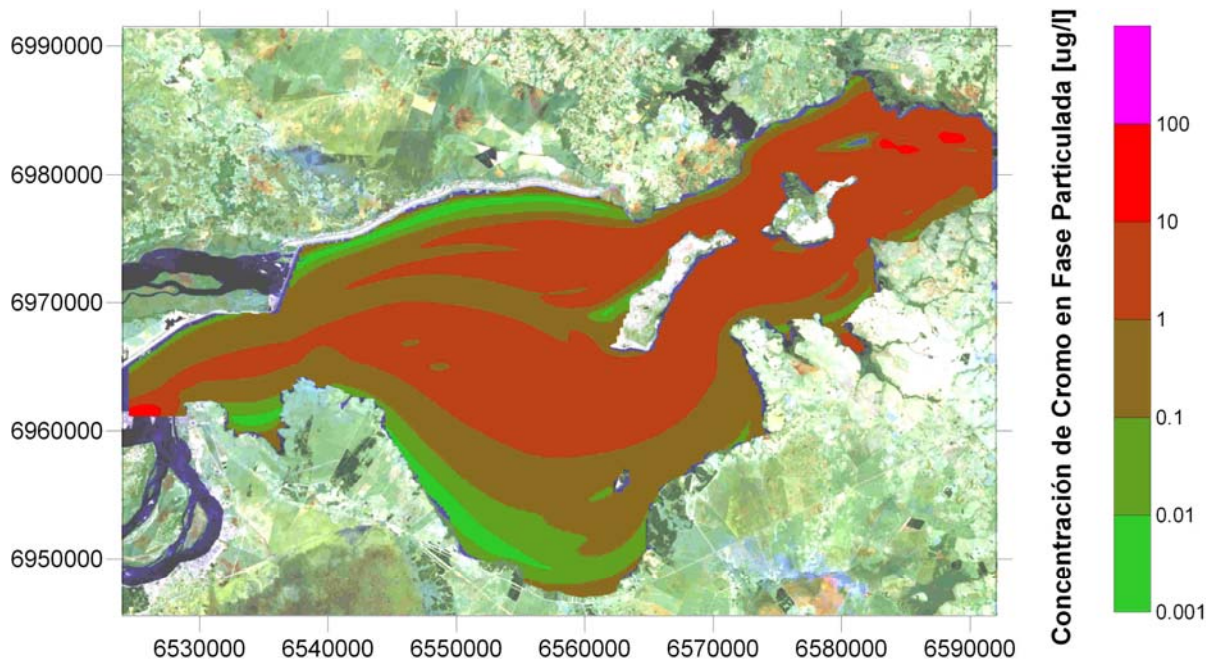


c) Escenario A83-Me

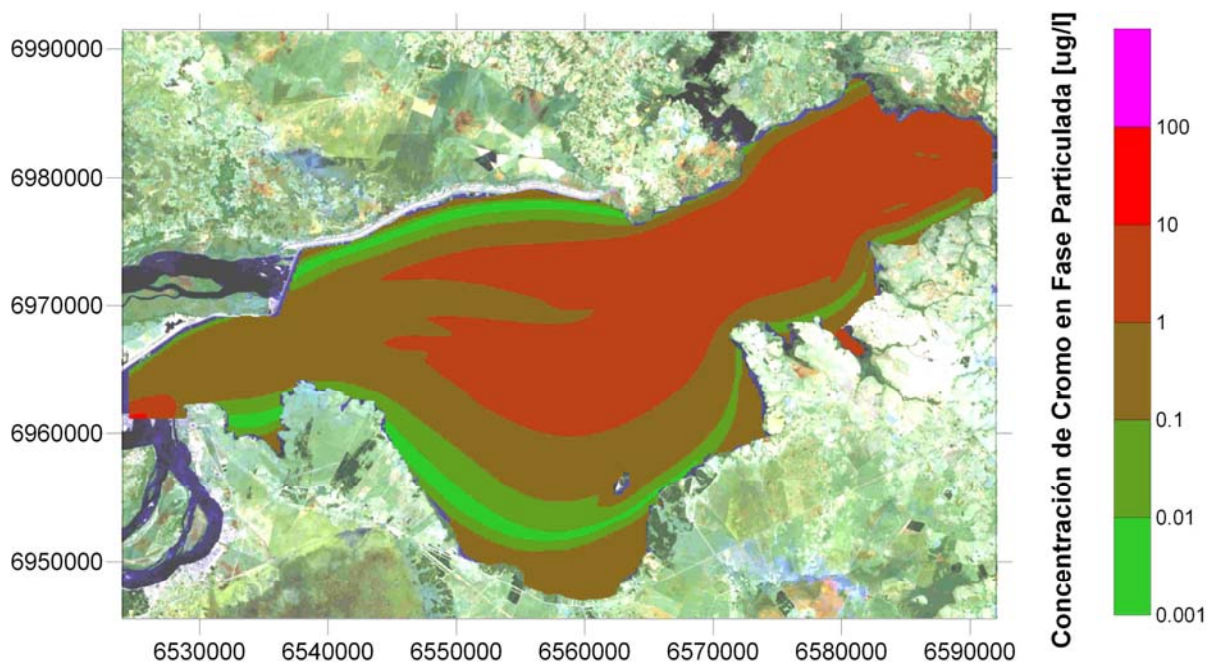
Figura 3.2.15 Distribución de concentración de cromo en columna de agua



a) Escenario A76-Me

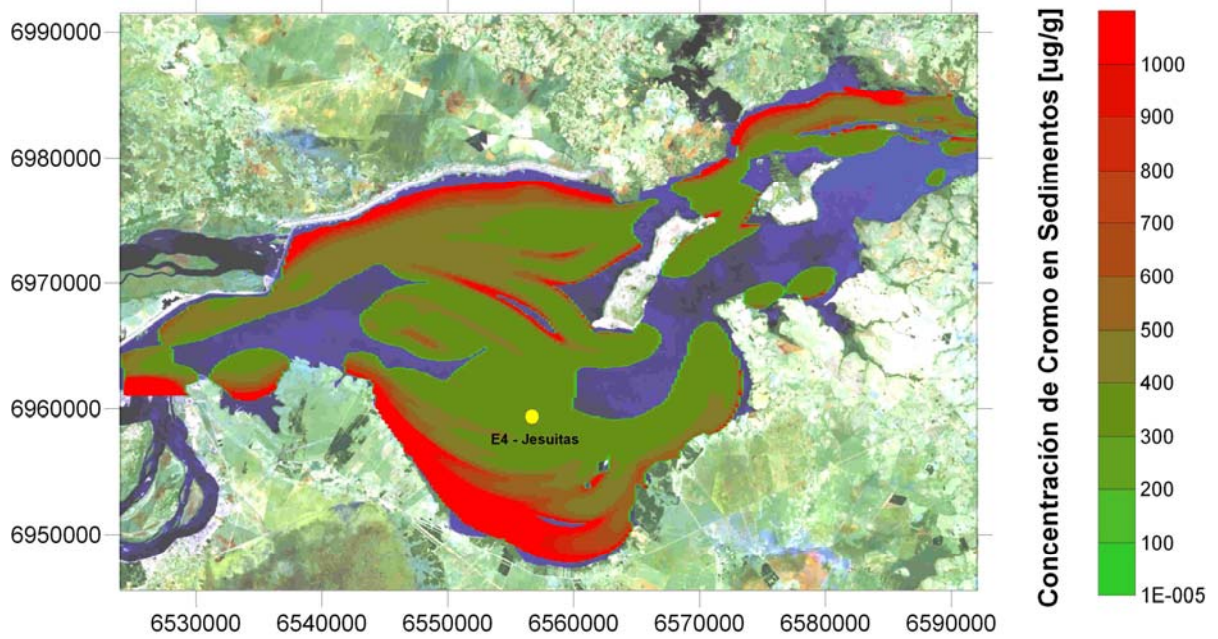


b) Escenario A78-Me

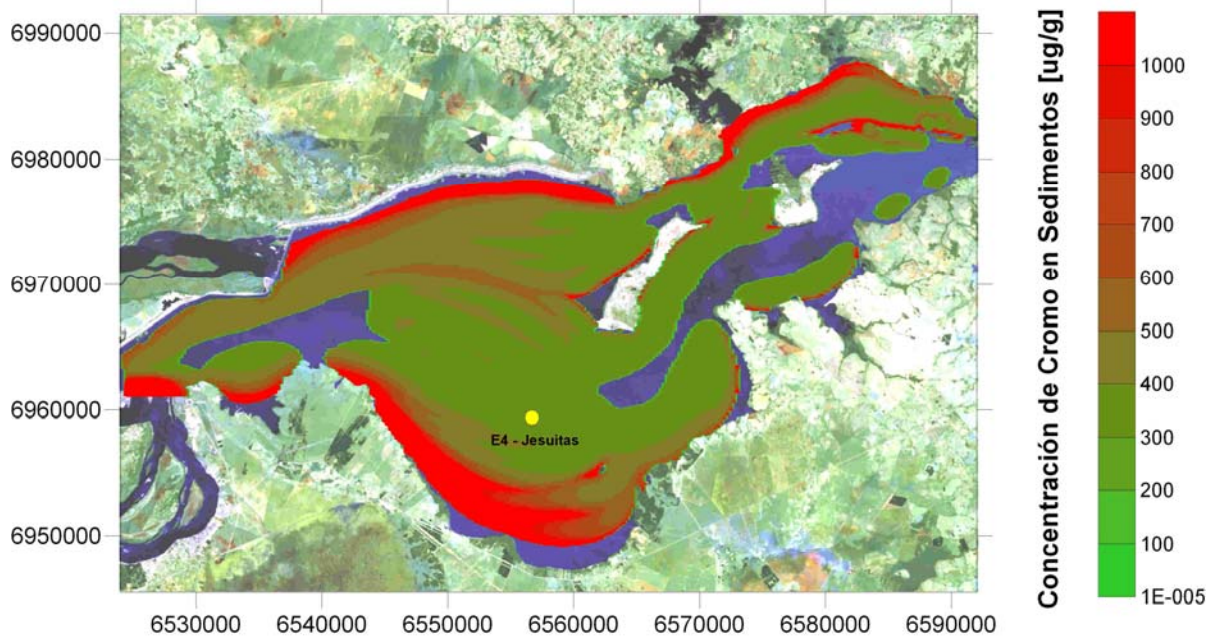


c) Escenario A83-Me

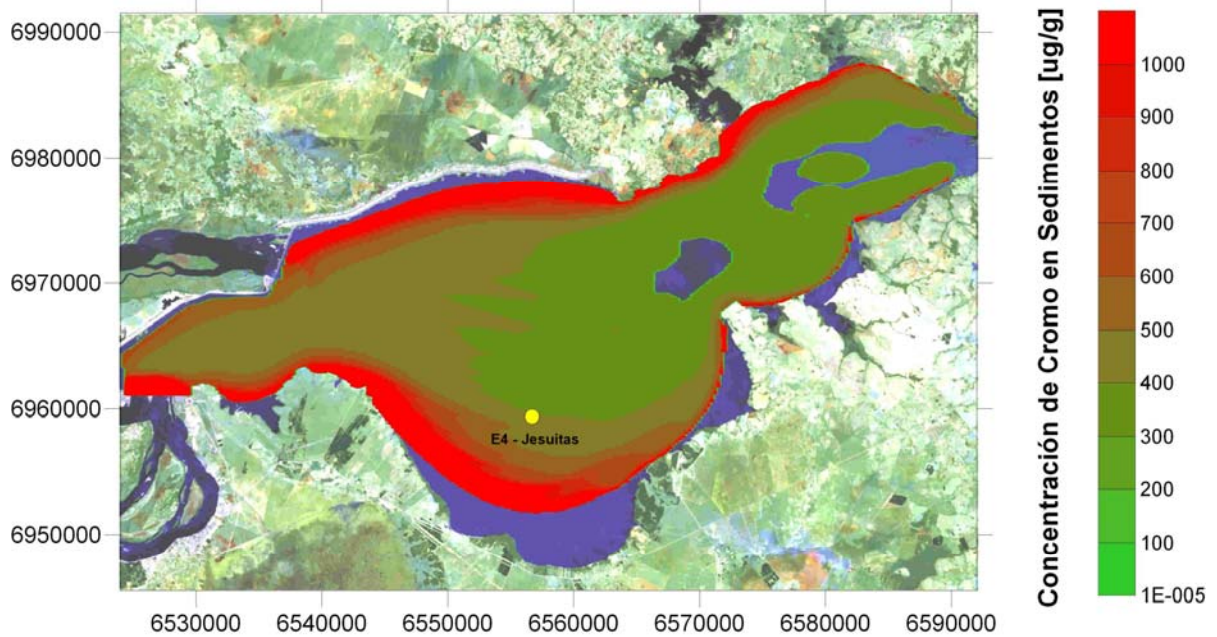
Figura 3.2.16 Distribución de concentración de cromo particulado en columna de agua



a) Escenario A76-Me



b) Escenario A78-Me



c) Escenario A83-Me

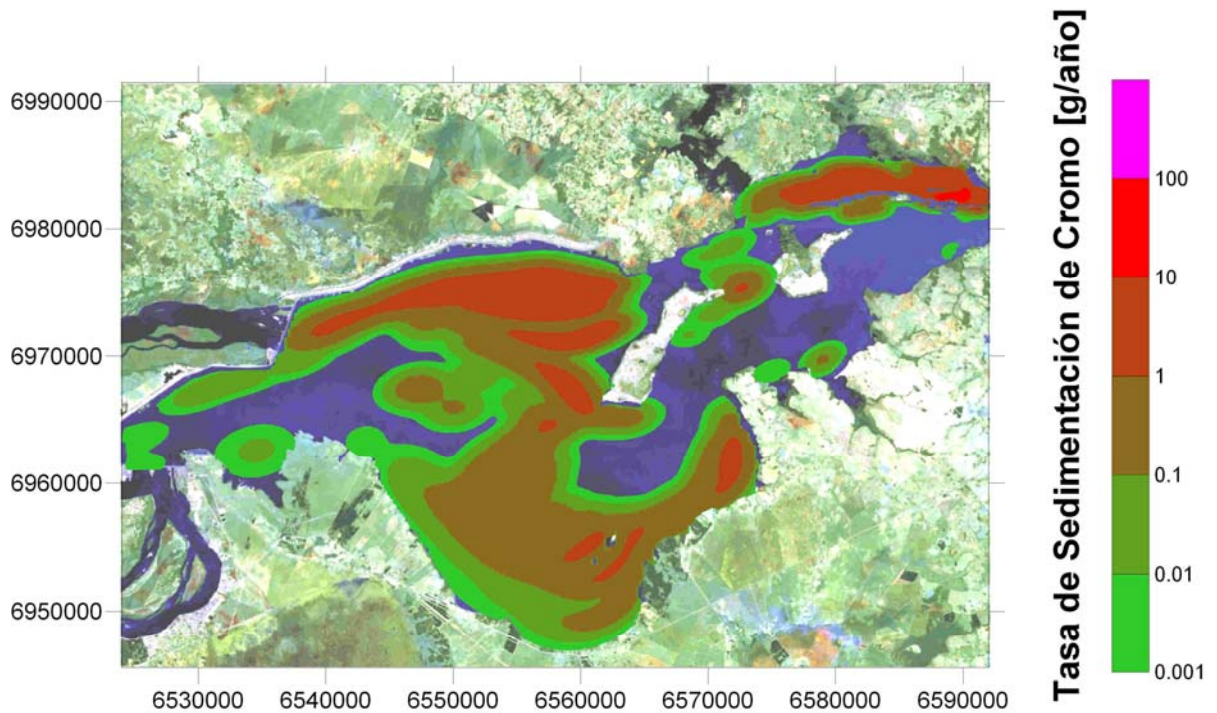
Figura 3.2.17 Distribución de concentración de cromo en sedimento

Tabla 3.2.13

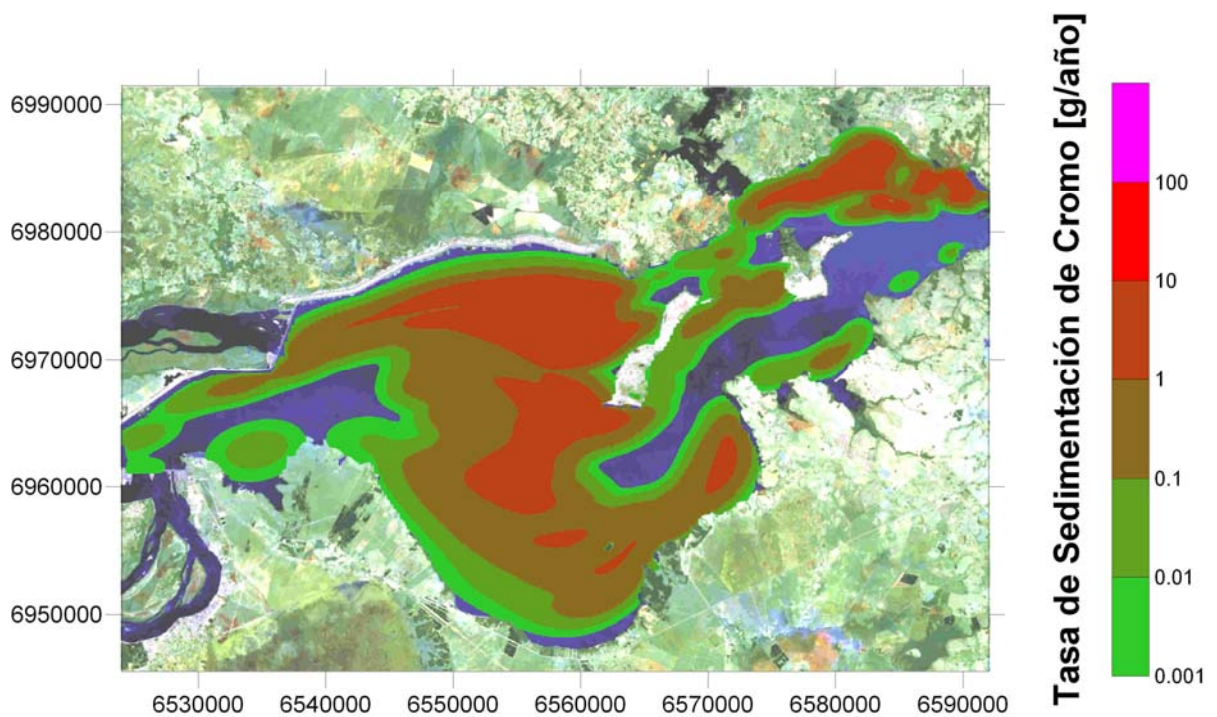
Valores puntuales de concentración de cromo en columna de agua y en sedimento, para distintas cotas de embalse.

Estación	Concentración en columna [$\mu\text{g/l}$]			Concentración en sedimento [$\mu\text{g/g}$]		
	A76	A78	A83	A76	A78	A83
EM 1	1,9	0,7	3,4	616	476	361
EM 2	1,1	1,2	0,9	363	365	361
EM 3	0,5	2,2	2,6	428	344	343
EM 4	1,8	1,6	1,8	395	415	470
EM 5	0,4	1,3	1,3	0	405	393
EM 6	1,9	1,9	0,9	332	344	419
EM 7	0,1	0,0	0,0	838	1275	2440
EM 8	0,4	0,2	0,1	664	746	874
EM 9	49,6	39,3	13,3	5552	4763	3021

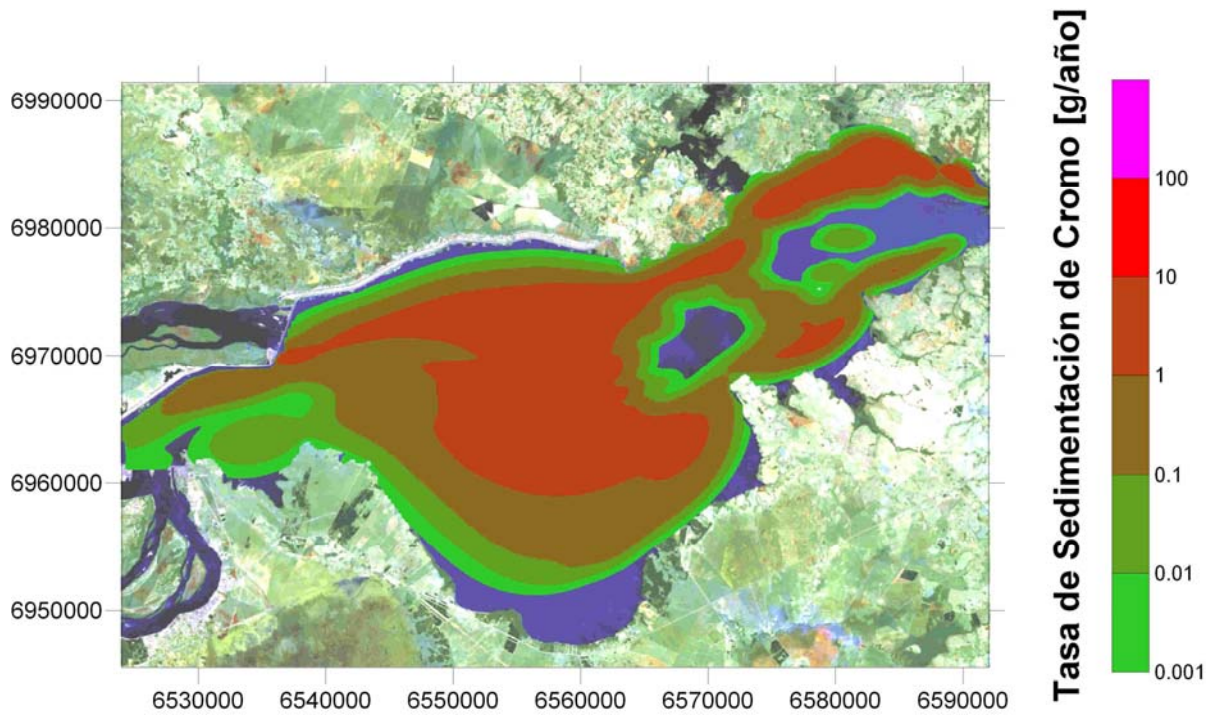
En las figuras 3.2.18a a 3.2.18c se muestran las distribuciones de tasa de sedimentación de cromo. Las masas acumuladas anuales de cromo en el embalse correspondientes a estos escenarios se muestran en la tabla 3.2.14 y en la figura 3.2.19.



a) Escenario A76-Me



b) Escenario A78-Me



c) Escenario A83-Me

Figura 3.2.18 Distribución de tasa de sedimentación de cromo

Tabla 3.2.14

Rango de tasas de sedimentación total de cromo en el embalse para los escenarios de aumento de cota de embalse

Valor	Sedimentación (ton/año)		
	A76	A78	A83
Mínimo	185	213	314
Medio	519	597	883
Máximo	1457	1678	2481

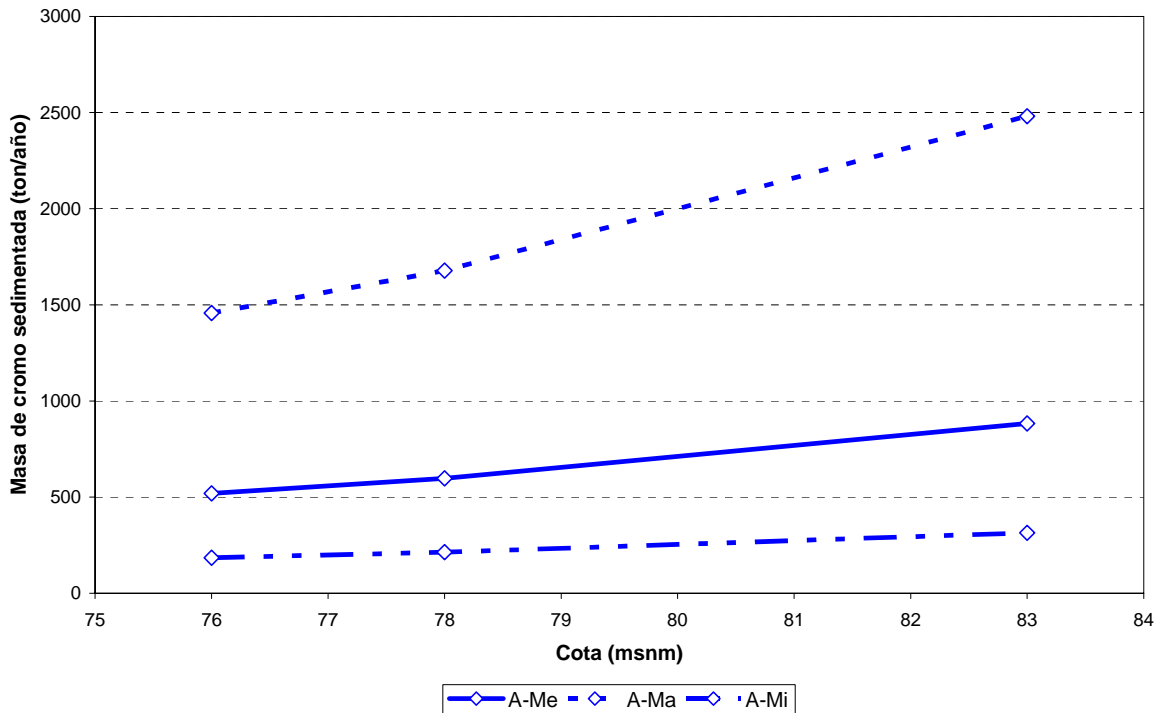
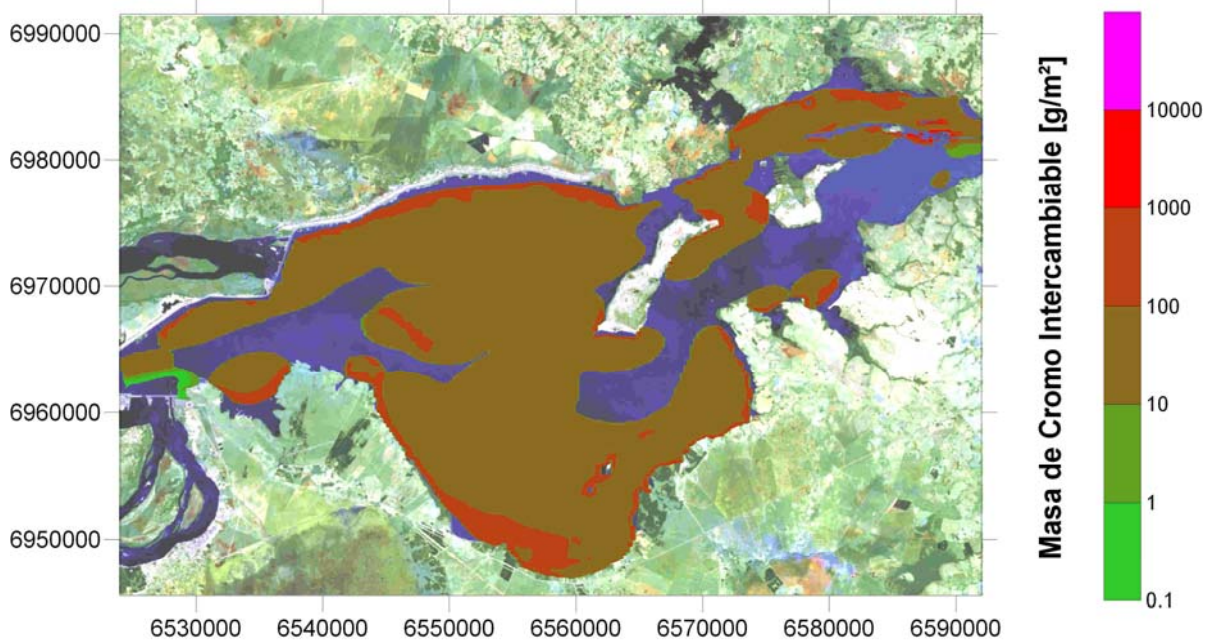
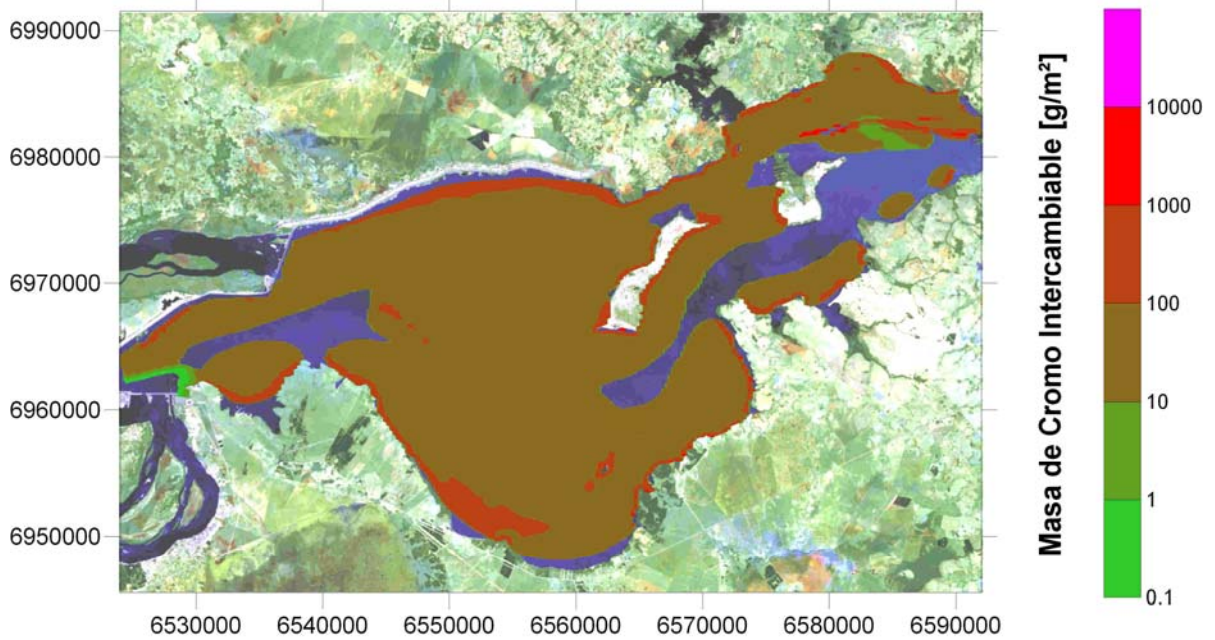


Figura 3.2.19 Masa de cromo sedimentada en el embalse para el escenario A

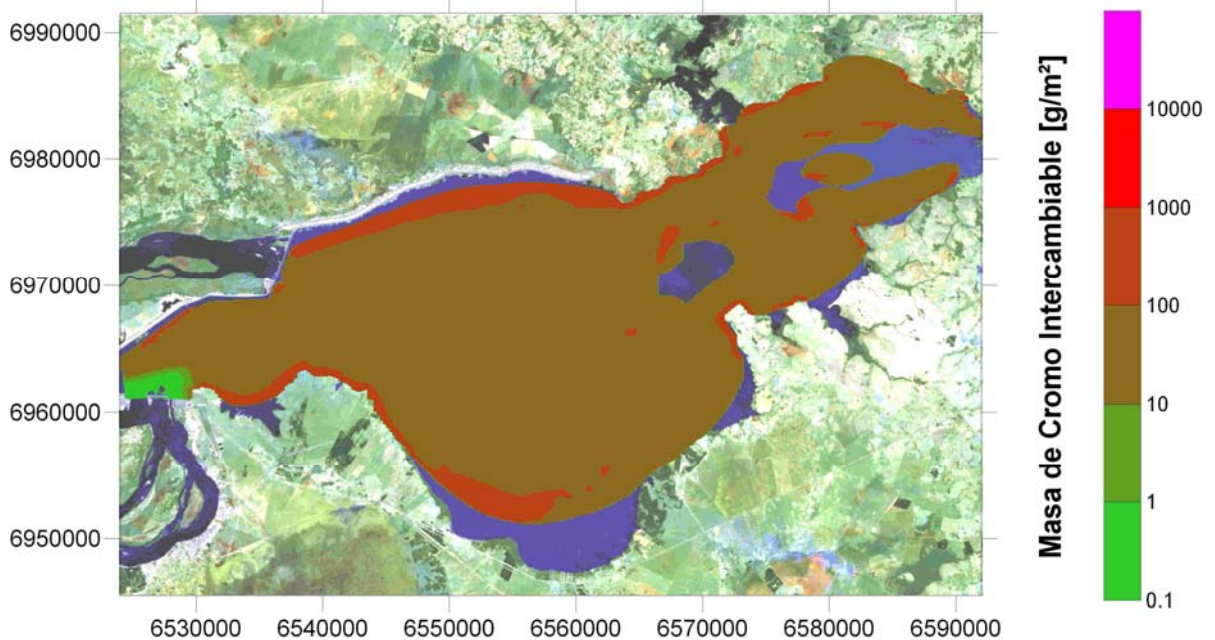
Las distribuciones de masa intercambiable se muestran en las figuras 3.2.20a a 3.2.20c, para el escenario de concentración media en la entrada, mientras que en la tabla 3.2.15 y en la figura 3.2.21 se muestran los valores de masa total intercambiable.



a) Escenario A76-Me



b) Escenario A78-Me



c) Escenario A83-Me

Figura 3.2.20 Distribución de masa de cromo sedimentada intercambiable

Tabla 3.2.15

Rango de valores de masa total de cromo intercambiable en el embalse para los escenarios de aumento de cota de embalse

Valor	Masa (miles de ton)		
	A76	A78	A83
Mínimo	19	22	23
Medio	53	62	64
Máximo	149	173	180

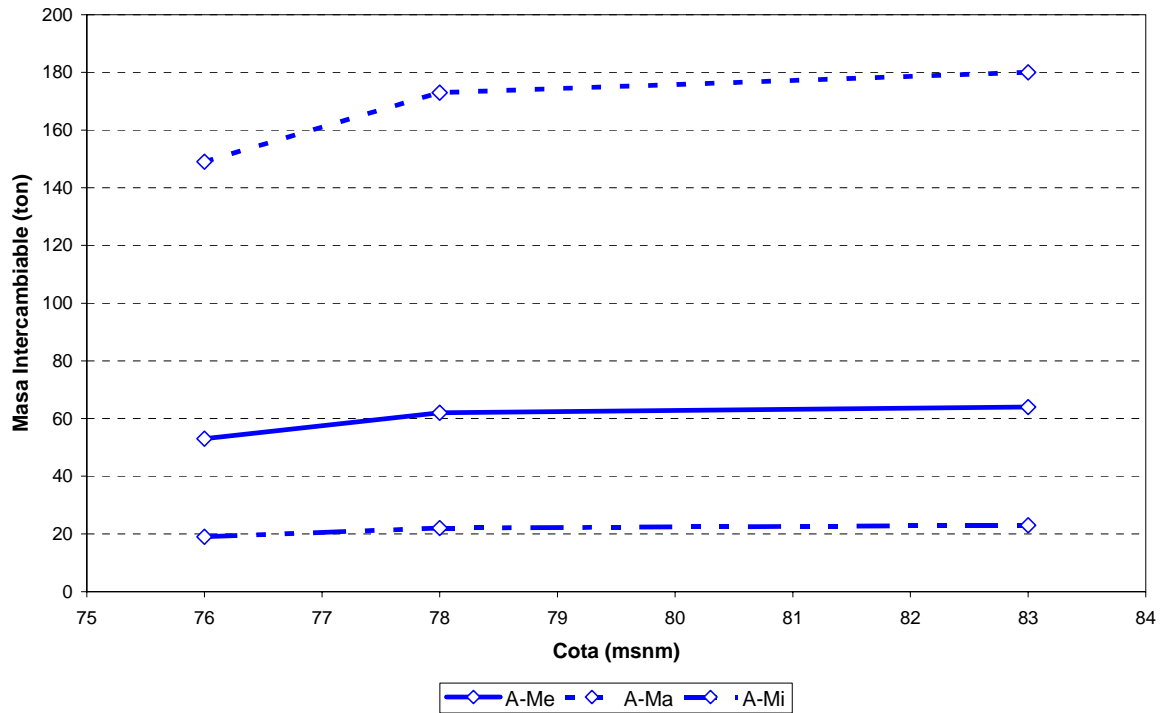


Figura 3.2.21 Masa de cromo intercambiable en sedimento para el escenario A

4 CONCLUSIONES

La modelación del transporte de metales se ha utilizado, por un lado, como una herramienta de interpretación de los datos de monitoreo disponibles y, por el otro, como un procedimiento de extrapolación para determinar las condiciones para escenarios futuros de elevación de la cota del embalse. Dada la limitación de la base de datos, en cuanto a cantidad y oportunidad de las mediciones, se ha encarado la modelación de condiciones medias, y se ha considerado una amplia banda de variación cuyos valores máximo y mínimo resultan de multiplicar y dividir, respectivamente, los valores medios por un factor del orden de 3, de modo de englobar la mayoría de los datos existentes.

Los modelos así construidos tienden a sobrestimar la concentración en sedimento, es decir, están del lado de la seguridad. Los valores medidos tienden a caer en el rango que va del mínimo al medio de la banda de variación.

Las principales conclusiones del estudio son las siguientes:

- La carga media ingresante al embalse es del orden de los 50 g/s para los tres metales.
- Al contrario de lo que sucede para el cobre y el cromo, la fracción particulada de plomo en columna de agua parece ser minoritaria frente a la fracción disuelta.
- No se observan cambios significativos en las concentraciones de metal en columna de agua y en sedimento al elevar la cota del embalse desde los 76 msnm actuales hasta los 83 msnm.
- Para el cobre, la concentración en columna de agua está básicamente en el rango de 1 a 10 $\mu\text{g/l}$, con picos cercanos a 100 $\mu\text{g/l}$ a la salida del BP. La concentración en sedimento está en el rango de 300 a 500 $\mu\text{g/g}$ para la parte central del embalse, alcanzando valores del orden de 1000 $\mu\text{g/g}$ en las zonas marginales y de varios miles de $\mu\text{g/g}$ a la salida del BP.
- Para el plomo, la concentración en columna de agua también está básicamente en el rango de 1 a 10 $\mu\text{g/l}$, con picos cercanos a 100 $\mu\text{g/l}$ a la salida del BP. La concentración en sedimento está en el rango de 100 a 300 $\mu\text{g/g}$ para la parte central del embalse, alcanzando valores del orden de 700 $\mu\text{g/g}$ en las zonas marginales y de varios miles de $\mu\text{g/g}$ a la salida del BP.
- Para el cromo, la concentración en columna de agua sigue estando básicamente en el rango de 1 a 10 $\mu\text{g/l}$, ahora con picos cercanos a 50 $\mu\text{g/l}$ a la salida del BP. La concentración en sedimento está en el rango de 300 a 500 $\mu\text{g/g}$ para la parte central del embalse, alcanzando valores del orden de 800 $\mu\text{g/g}$ en las zonas marginales y de varios miles de $\mu\text{g/g}$ a la salida del BP.
- El incremento de la tasa de metal sedimentado sobre todo el embalse, respecto de la situación a cota 76 msnm, está en el rango del 5 al 10% para la cota 78 msnm y

del 50 al 70% para la cota 83 msnm. Esa tasa es del orden de varios cientos de toneladas por año.

- El incremento de la masa de metal sedimentado intercambiable sobre todo el embalse, respecto de la situación a cota 76 msnm, está en el rango del 7 al 17% para la cota 78 msnm y del 13 al 21% para la cota 83 msnm. Esa masa es del orden de cientos de miles de toneladas.

A partir de estas conclusiones, surgen las siguientes observaciones:

- Si bien las concentraciones informadas para columna de agua y sedimentos podrían compararse con niveles guía (ver Jaime et al. 2004), para determinar la peligrosidad de la presencia de metales, desde el punto de vista toxicológico, sería necesario estudiar qué efectos pueden producir esas concentraciones sobre la biota.
- Si, efectuado el estudio, se llegara a la conclusión de que ellas constituyen una amenaza, deberían identificarse las fuentes de aporte de los residuos metálicos y formular un plan de manejo para su control.

REFERENCIAS

1. Álvarez Tagliabue, C., Menéndez, A.N., 2003, "Modelación Hidrodinámica del embalse de Yacyretá", Informe INA-LHA 01-224-03, mayo. Comitente: EBY.
2. Álvarez Tagliabue, C., Menéndez, A.N., 2004, "Modelo de transporte de sólidos suspendidos en el embalse de Yacyretá", Informe INA-LHA 04-225-04, Comitente: EBY, mayo.
3. Jaime, P.R., Natale, O., Menéndez, A.N., 2004, "Establecimiento de parámetros prioritarios de calidad del agua en el embalse de Yacyretá", Informe INA-LHA 03-225-04, mayo. Comitente: EBY.
4. Mills, W.B., Porcella, D.B., Unga, M.J., Gherini, S.A., Summers, K.V., Lingfung Mok, Rupp, G.L., Bowie, G.L., Haith, D.A. 1985, "Water Quality Assessment: A Screening Procedure for Toxic and Conventional Pollutants in Surface and Ground Water – Part I", Report EPA/600/6-85/002a.