

01162



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**“DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA
TURBIDEZ EN EL EMBALSE DEL P.H. LA PAROTA”**

T E S I S

Como requisito para obtener el grado de
**MAESTRA EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)**

Presenta
Aline Rosete Rosete

DIRECTOR DE TESIS
Dr. Jesús Gracia Sánchez

MÉXICO, D.F.

Octubre, 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

El presente trabajo, tiene como finalidad predecir la turbidez dentro del embalse y en la descarga de la obra de toma de una presa para determinar la calidad del agua en relación con los sólidos en suspensión, y la determinación de las zonas donde se deposita el material suspendido y su cuantificación.

El movimiento de la turbidez dentro de un embalse se debe principalmente a dos fenómenos de transporte que son la convección y la difusión. Éste último es difícil de determinar para casos reales, por ello en este trabajo se presentan los resultados obtenidos con simulaciones que emplean diferentes coeficientes de difusión determinando así su influencia en la distribución de la turbidez dentro de un embalse, para ello se emplea un modelo bidimensional en la dirección vertical.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. IMPORTANCIA DE LA TURBIDEZ	3
2.1 Antecedentes	3
2.2 Ecuación general de transporte de sedimentos	6
3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO NUMÉRICO	11
3.1 Discretización del vaso de almacenamiento	11
3.2 Hidrodinámica del embalse	14
3.2.1 Malla de cálculo	15
3.2.2 Manejo de la información de las secciones transversales	16
3.2.2.1 Cálculo de anchos promedio	16
3.2.2.2 Áreas transversales	17
3.2.3 Determinación de las velocidades	18
3.2.3.1 Velocidades horizontales	18
3.2.3.2 Velocidades verticales	19
3.3 Modelo numérico de concentración de sedimentos	19
3.3.1 Ecuación general de transporte de sedimentos en diferencias finitas	20
3.3.2 Coeficiente de difusión	24
4. DATOS DEL P.H. LA PAROTA	27
4.1 Ubicación geográfica	27
4.2 Características del embalse	31
4.3 Batimetría del embalse	33

4.4 Gastos líquidos de entrada	33
4.5 Aporte de sedimentos	34
4.6 Sólidos transportados por las corrientes	36
4.7 Operación del embalse	40

5. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO Y RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

41

5.1 Datos empleados para las simulaciones	42
5.2 Resultados de la simulaciones	43

6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

55

6.1 Influencia del coeficiente de difusión en los resultados	56
6.2 Tasas de sedimentación anual en el embalse	57
6.3 La turbidez y la calidad del agua	58
6.4 Variación del volumen de sedimentos dentro del embalse a lo largo del tiempo	60
6.5 Escenarios corto, mediano y largo plazo	61

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

63

REFERENCIAS

67

APÉNDICE A

Secciones transversales desde la confluencia de los ríos Omitlán y Papagayo hasta la cortina del P.H. La Parota

APÉNDICE B

Perfiles de concentración para los distintos tipos de material analizados

APÉNDICE C

Distribución de la concentración de sedimentos en el embalse

APÉNDICE D

Depósito del material sólido producto de la turbidez

APÉNDICE E

Programa para la adquisición de los datos de la malla de cálculo
(datos-venta-parota.mcd)

APÉNDICE F

Programa para el cálculo de la turbidez
(Turbidez.cpp)

AGRADECIMIENTOS

A **Dr. Jesús Gracia Sánchez** a quien agradezco la asesoría y dedicación para la realización del presente trabajo; por su paciencia y amistad

Al Instituto de Ingeniería UNAM (Hidráulica)

por el apoyo integral brindado durante mi formación profesional y en la realización de este trabajo

A los miembros del jurado: Dr. Ramón Domínguez, Dr. Oscar Fuentes, Dr. Carlos Escalante, M.I. Víctor Franco, quienes proporcionaron su valioso tiempo y comentarios referentes al trabajo presentado

AGRADECIMIENTOS

A **DIOS** por ser la luz de mi camino,
por permitirme la existencia y
otorgarme la capacidad
de pensar y
razonar

A mis padres **ANA MARÍA ROSETE Y JEHÚ ROSETE** quienes
con esfuerzo, trabajo, inmensa comprensión y gran cariño
hicieron posible mi formación moral y
académica, que será la herencia
más valiosa en
mi vida

A mis hermanos **AURA Y JEHÚ**
quienes con amor, respeto y
apoyo me motivaron
para seguir
adelante

1. INTRODUCCIÓN

Los objetivos principales del presente trabajo, son la predicción de la turbidez dentro del embalse de una presa, para determinar la calidad del agua, en relación con los sólidos en suspensión, dentro del vaso y la obra de toma; y la determinación de las zonas donde se deposita el material suspendido y su cuantificación.

El material o sedimento que entra al embalse tiene principalmente dos destinos: el primero, es permanecer en suspensión dentro del vaso, a lo que se le denomina turbidez, la cual ocasiona problemas en la calidad del agua almacenada, ya que puede afectar a la flora y fauna presentes, así como también puede llegar a interferir en la calidad del efluente; el segundo, es depositarse en su interior y disminuir de la capacidad útil del vaso.

En el capítulo 2. se presenta la importancia de la turbidez en embalses, los índices de turbidez, los modelos existentes, así como los efectos que se presentan en la flora, fauna y en el agua potable.

En el capítulo 3 se describe la discretización del vaso de almacenamiento; se calcula la hidrodinámica del embalse y, en especial, se analiza el tramo cercano a la obra de toma. El planteamiento numérico incluye las ecuaciones de difusión empleadas en el modelo de turbidez. El modelo numérico incluye desde la adquisición de la información inicial hasta la generación de los resultados en diferentes lugares del embalse.

Dentro del capítulo 4 se presentan los datos generales del embalse necesarios para el desarrollo del trabajo.

En el capítulo 5 se menciona el cálculo de la evolución de la turbidez en el embalse del P. H. La Parota, que se compara con los resultados del modelo numérico planteado en el capítulo anterior.

En el capítulo 6 se da la interpretación de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores.

Por último, en el capítulo 7, se dan las conclusiones y recomendaciones para desarrollar futuros trabajos relacionados con el tema.

2. IMPORTANCIA DE LA TURBIDEZ

2.1 Antecedentes

Para predecir la turbidez en embalses, existen antecedentes en otros países como Japón con Naomura y Aki [1976], Kikkawa [1978], Iwasa y Matsuo [1981], y México con Gracia *et al* [1992]. Con base en estos estudios se propone un modelo numérico para determinar el comportamiento del material en suspensión dentro de un embalse.

La primera versión del modelo empleado se presentó en Gracia *et al* [1992a y 1992b] para los embalses de los P. H. Zimapán y Aguamilpa, respectivamente.

Cabe señalar que la turbidez no se asocia solamente con factores físicos sino también con otros de carácter químico y biológico, que cambian el comportamiento de las partículas suspendidas. En términos prácticos, se puede decir que la turbidez es la propiedad del agua

para refractar la luz y es considerada como un indicador de la concentración de la materia suspendida en el agua.

En el trabajo que aquí se presenta se establece que la turbidez es originada solamente por la presencia de sólidos suspendidos constituidos por el material de lavado y, por lo tanto no existe evolución química ni biológica.

La materia total suspendida (MTS) consiste en una mezcla de materia inorgánica y orgánica, el impacto de la MTS es importante en el agua y depende principalmente de dos factores, uno de ellos es la presencia física de partículas en el agua y el otro depende de la atenuación de la luz.

Mientras la materia inorgánica (como las partículas de arcilla), puede considerarse que no cambia en su paso por el embalse; la orgánica (por ejemplo microorganismos y células muertas), puede alterarse significativamente de acuerdo con su evolución químico - biológica dentro del embalse. Esto implica que con tiempos largos de retención, puede haber cambios del material suspendido, y en consecuencia de la turbidez, debido al desarrollo de microorganismos a expensas, especialmente, de la materia orgánica. Sin embargo, en la referencia PUMA [2004] se menciona que la DQO registrada en la estación la Venta varía entre 3.9mg/l y 29 mg/l, lo que equivale a 0.0039 kg/m³ y 0.029 kg/m³ respectivamente. La DQO se asocia directamente con la cantidad de materia orgánica total (biodegradable y no degradable), por lo tanto se observa que ésta es baja en comparación con las concentraciones de material de lavado, es por ello que se puede despreciar en los cálculos.

Cabe mencionar que en estudios previos sobre el tema, se manejan dos unidades diferentes para medir la turbidez. La primera se refiere a la concentración de MTS por unidad de volumen de agua (kg/m³ o g/l) y que será la que se emplee en este trabajo. La segunda se refiere a unidades nefelométricas de la turbiedad (NTU). Aunque las unidades g/l y NTU parecieran estar bien correlacionadas, en la práctica esto no siempre ocurre. En términos generales se puede decir que cuando existe una buena correlación entre estas unidades, se cumple teóricamente con que 1 NTU = 0.001 g/l = 1 mg/l. Sin embargo, es necesario tener

mucho cuidado porque existen referencias [p.e. Miller, 2002], que muestran casos donde prácticamente tal relación no existe.

Lo anterior se puede entender si se considera que, por ejemplo, en un mismo sitio de un embalse, en dos fechas diferentes, si la concentración de MTS es la misma, la turbidez expresada en NTU's puede ser diferente, ya que depende de la refractancia de la luz producida por las partículas suspendidas y si estas no son del mismo tipo en ambas fechas, el resultado será diferente. Esto se puede deber a que las partículas orgánicas evolucionan de manera diferente, debido a diversos factores como son por ejemplo, cambios de luminosidad, temperatura, nutrientes, etc., por tanto la cantidad de materia orgánica será diferente en las dos fechas.

En algunos trabajos [ICOLD, 1993] se considera que el impacto del sedimento en la calidad del agua de un embalse es todavía motivo de grandes especulaciones. De hecho se considera que el depósito de sedimento puede tener tanto impactos positivos como negativos en el proceso de eutroficación, que es el proceso natural de enriquecimiento en nutrientes de un cuerpo de agua, mediante el cual evoluciona hacia el estado de ciénaga o pantano hasta desaparecer finalmente. Los nutrientes pueden ser materia orgánica, nitrógeno o fósforo, que se encuentran en los afluentes al cuerpo de agua. En la primera etapa de la eutroficación acelerada por las actividades del hombre, aumentan las plantas acuáticas, lo que lleva a una deficiencia de oxígeno disuelto y, en casos extremos, a la muerte de otros organismos acuáticos. Cuando existe un apropiado flujo de nutrientes, carbono, y luz, pueden existir desarrollos de algas que alteren significativamente la calidad del agua. El fósforo y el nitrógeno son los principales nutrientes que condicionan el crecimiento de las plantas en un embalse; sin embargo, se ha encontrado que el fósforo también es el principal limitante; este nutriente es transportado a los embalses en solución y, generalmente, penetra adherido a las partículas de sedimento, por lo tanto su comportamiento dependerá del de las partículas.

Se ha observado que la turbidez y la producción de algas en los embalses son inversamente proporcionales, es decir, a menor turbidez, mayor desarrollo de algas y viceversa. Al parecer, el bloqueo de la luz por las partículas sólidas suspendidas influye en los procesos

fotosintéticos. El impacto del incremento de la turbidez puede actuar en los cambios biológicos debidos al cambio de la temperatura. Se ha observado que la turbidez de las capas superiores del agua, inhibe de manera significativa el ascenso de temperatura en las capas interiores del embalse.

El sedimento también puede ser un factor muy importante en el transporte de pesticidas, sin embargo este aspecto no ha sido estudiado suficientemente.

Una etapa crítica, respecto a la calidad del agua, es el proceso de llenado del embalse, ya que ocurre la descomposición de la vegetación existente sobre la superficie del terreno, que se transforma en una abundancia de nutrientes con lo cual se puede propiciar la sobrepoblación de peces. Sin embargo, esto puede ser acompañado de una depresión de nutrientes, que sólo a lo largo de los años podrá finalmente propiciar un equilibrio de la calidad del agua en el embalse. Cabe destacar que aunque sea indirectamente, también en este aspecto tiene influencia el sedimento entrante al embalse, ya que los depósitos de sedimento sirven como hábitat de algunos animales o plantas que son críticos dentro de la cadena alimenticia de los peces. Esto se debe a que, como ya se mencionó, la turbiedad tiene un efecto considerable en la ecología de los cuerpos del agua, pues la reducción en la penetración de luz causada por el material suspendido, origina la producción primaria de diversos organismos como son los microfitos y los macrofitos, que desempeñan a menudo un papel importante en el alimento para una gran diversidad de peces, ya que proporcionan el medio idóneo para la proliferación de perifitos y bacterias.

2.2 Ecuación general del transporte de sedimentos

Para hacer una estimación de la turbidez dentro de un embalse es necesario definir la ecuación general de transporte de sedimentos que permite calcular la cantidad de material que se mueve en el embalse. La deducción de dicha ecuación se presenta a continuación.

Principalmente existen dos procesos para el transporte suspendido de sedimento:

- a) la convección
- b) la difusión (molecular y turbulenta)

El transporte de sedimentos por convección se debe a que las partículas son arrastradas por el flujo a la misma velocidad promedio del agua. El transporte producido por la velocidad de caída del sedimento también se considera como transporte convectivo.

Cuando se calcula el flujo F , a través de una superficie dada con área A , se utiliza la ecuación siguiente:

$$F = cUA \tag{2.1}$$

donde U es la velocidad promedio del flujo normal a la superficie A ; y c es el promedio de la concentración del sedimento arrastrado por el flujo que cruza a través del área. La velocidad del sedimento será la suma vectorial de la velocidad del agua y la velocidad de caída del sedimento.

En la figura 2.1 a) se muestra el caso donde un flujo horizontal cruza una frontera vertical, la velocidad normal a la frontera es $|\bar{U}|$ éste valor es empleado en la ecuación 2.1 para determinar el flujo de sedimento a través de la frontera. En la figura 2.1 b), se presenta el caso donde la frontera es paralela al flujo, en éste caso, la velocidad a emplear en la ecuación 2.1 para determinar el flujo de sedimento es $|\bar{\omega}|$

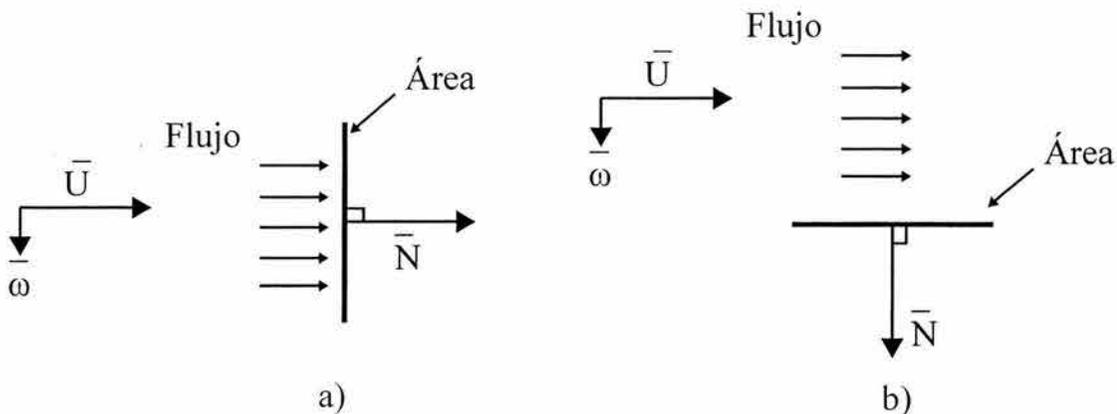


Figura 2.1

El otro proceso es la difusión turbulenta de sedimentos. Ésta se debe a la turbulencia del flujo y a los gradientes de concentración. El mezclado turbulento generalmente se modela

con el coeficiente de la mezcla turbulenta, α , definido como el flujo de sedimento dividido por el gradiente de la concentración:

$$\alpha = \frac{F}{\frac{A}{\frac{dc}{dx}}} \quad (2.2)$$

Normalmente, el transporte convectivo será el dominante, debido a que la difusión pura es un proceso de transporte que requiere de mucho tiempo. Se puede inferir que la escala de longitud para la difusión en un período de tiempo dado, T_0 , es proporcional a $(\alpha T_0)^{1/2}$, mientras que la correspondiente escala temporal de difusión para una distancia L_0 es proporcional a $\frac{L_0^2}{\alpha}$ (Streeter, Víctor L *et al*).

Se observa claramente que la difusión molecular es un agente de transporte muy lento pero persistente y será importante en casos donde la velocidad es cero o cercana a cero.

La ecuación de convección – difusión para el transporte de sedimento está dada por la ecuación 2.3 (Olsen Nils, 1997):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + \omega \left(\frac{\partial c}{\partial x_3} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (2.3)$$

$(j = 1,2,3)$

La concentración está denotada por c , ω es la velocidad de caída de las partículas, U es la velocidad del agua, x_j es la dimensión en el espacio y α es la difusividad turbulenta. Las tres direcciones ($j = 1,2,3$) son: x_1 , x_2 y x_3 , y las velocidades en las tres direcciones son U_1 , U_2 y U_3 .

Considerando que el sistema de coordenadas es cartesiano: $x_1 = x$, $x_2 = y$ y $x_3 = z$; de la misma forma, las velocidades son, $U_1 = U_x$, $U_2 = U_y$ y $U_3 = U_z$.

Por lo anterior, los términos de la expresión 2.3 expresados en subíndices son:

$$U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = U_x \frac{\partial c}{\partial x} + U_y \frac{\partial c}{\partial y} + U_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

En notación tensorial se puede utilizar la convención de Einstein (Olsen, Nils), para tres dimensiones, y sustituyendo las ecuaciones 2.4 y 2.5 en la 2.3 se tiene:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_x \frac{\partial c}{\partial x} + U_y \frac{\partial c}{\partial y} + U_z \frac{\partial c}{\partial z} + \omega \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.6)$$

En este trabajo, sólo se analizarán dos dimensiones, la horizontal en la dirección del flujo y la vertical. No se considera la dirección transversal debido a que las velocidades en esta dirección son muy pequeñas y por tanto no afecta en los cálculos al realizar esta simplificación, por ello, en la ecuación 2.6, se eliminan las derivadas con respecto a y , y la coordenada z toma el lugar de la coordenada y . Por lo tanto, la ecuación 2.6 se reduce a la ecuación 2.7 donde x representa el eje horizontal y y el eje vertical. La ecuación 2.7 es usada para describir el proceso de transporte de sedimentos en dos dimensiones.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_x \frac{\partial c}{\partial x} + U_y \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \omega \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.7)$$

Debido a que el proceso de transporte por difusión en x es muy pequeño en comparación con el transporte por convección, en esta misma dirección, se desprecia el transporte por difusión, entonces la ecuación 2.7, se reduce a la 2.8, donde el coeficiente de difusión α se considera constante.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_x \frac{\partial c}{\partial x} + U_y \frac{\partial c}{\partial y} - \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \omega \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.8)$$

Para resolver la ecuación 2.8 y obtener los resultados de turbidez, en el capítulo tres del trabajo se resuelve dicha ecuación utilizando un esquema de diferencias finitas explícito.

3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO NUMÉRICO

3.1 Discretización del vaso de almacenamiento

Para estudiar la evolución de la concentración de sedimentos en el embalse es necesario discretizar el vaso por medio de una malla, como la que se muestra en la figura 3.1. La discretización se hace asignando en cada nudo de la malla, la pareja de valores elevaciones anchos, de tal forma que las áreas de las superficies que confinan cada celda, se pueden calcular a partir de las parejas de valores en esos nudos.

En la figura 3.2 se presenta un esquema de la planta del embalse donde se señala la ubicación de las secciones empleadas en el cálculo. Como se observa en esa figura, las secciones indicadas no están igualmente espaciadas, ya que para obtener una malla con un volumen igual al del embalse, se ubicaron en zonas donde se presentan cambios importantes de la sección transversal del embalse.

De cada una de las secciones indicadas, se obtiene la curva Elevaciones – Anchos de superficie libre (E-T) y para cada conjunto de parejas (E-T), en cada nudo de la malla, se define un conjunto de parejas de valores Elevación – Ancho en la sección (E-B).

La malla propuesta para discretizar el vaso está formada por veinte subtramos que abarcan en su totalidad el volumen almacenado en el tramo que va de la confluencia de los ríos Papagayo y Omitlán hasta La Parota, cuya superficie inundada corresponde a la cota del NAMO (según datos proporcionados por CFE), como se muestra en la figura 3.2. Para el sentido vertical, se propone que las celdas tengan una altura de 5 m, obteniéndose en el último tramo antes de la obra de toma treinta celdas en la dirección vertical.

Una vez discretizado el vaso, se calculó el volumen almacenado y se reubicaron algunas secciones para mejorar la representación del volumen del embalse. Es importante señalar que el volumen almacenado desde la cortina del P. H. La Parota hasta la confluencia de los ríos Papagayo y Omitlán es de $5116 \times 10^6 \text{ m}^3$ y que el volumen de los dos brazos aguas arriba de la confluencia es de $258.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, lo que significa que el volumen almacenado en las colas de los brazos es del orden del 5% del volumen total. Dado el poco volumen de almacenamiento y como la distribución de concentraciones en esas zonas es prácticamente uniforme, se considera que para el cálculo ocurre un mezclado total en la zona de confluencia.

Como el volumen de sedimento grueso es de $14.07 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ entonces en 20 años se tendrá un volumen de $20 \times 14.07 \times 10^6 = 281.4 \times 10^6 \text{ m}^3$, por lo cual este volumen es comparable con el de las colas en el vaso ($258.5 \times 10^6 \text{ m}^3$).

En el apéndice A, se presentan las secciones transversales de donde se obtuvieron los anchos para las diferentes elevaciones. Con esta información y el programa del apéndice E, se calcularon los anchos medios para las celdas que conforman la malla.

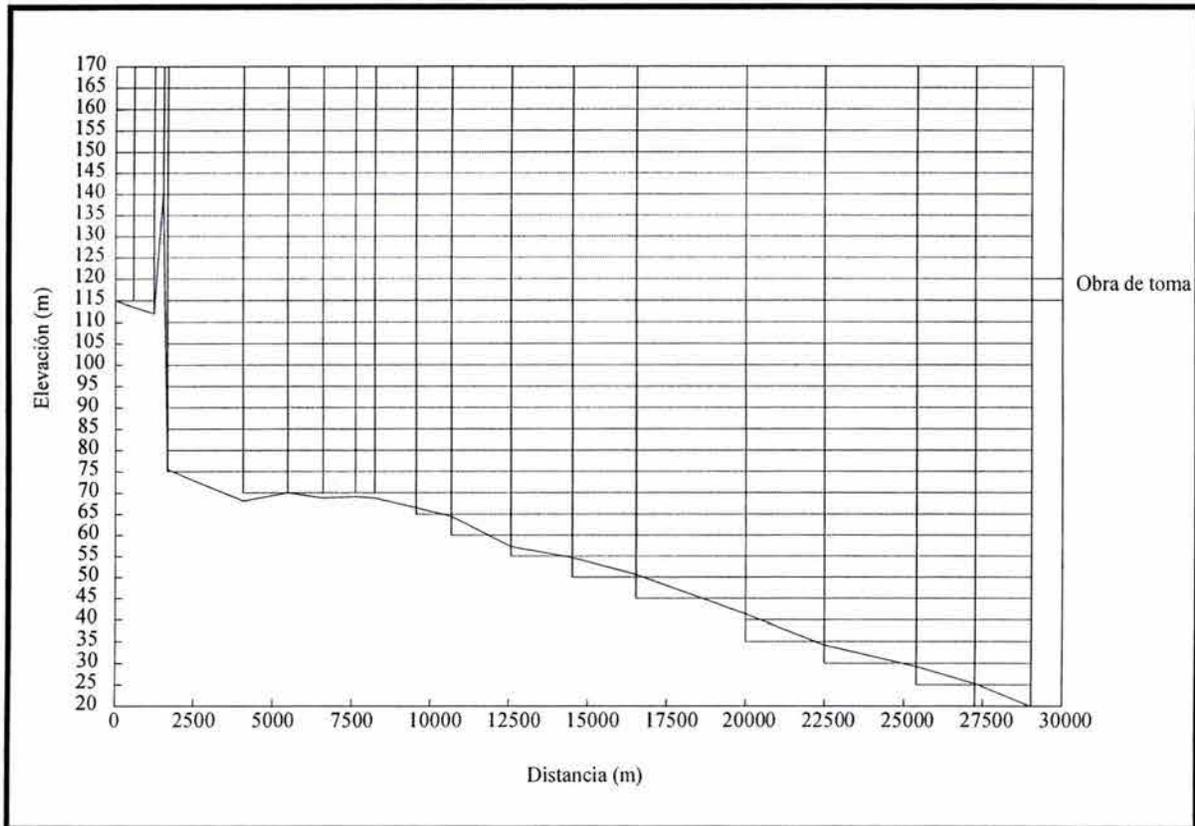


Figura 3.1 Discretización de las secciones del embalse (desde la confluencia de los ríos Papagayo y Omitlán hasta el P.H. La Parota).

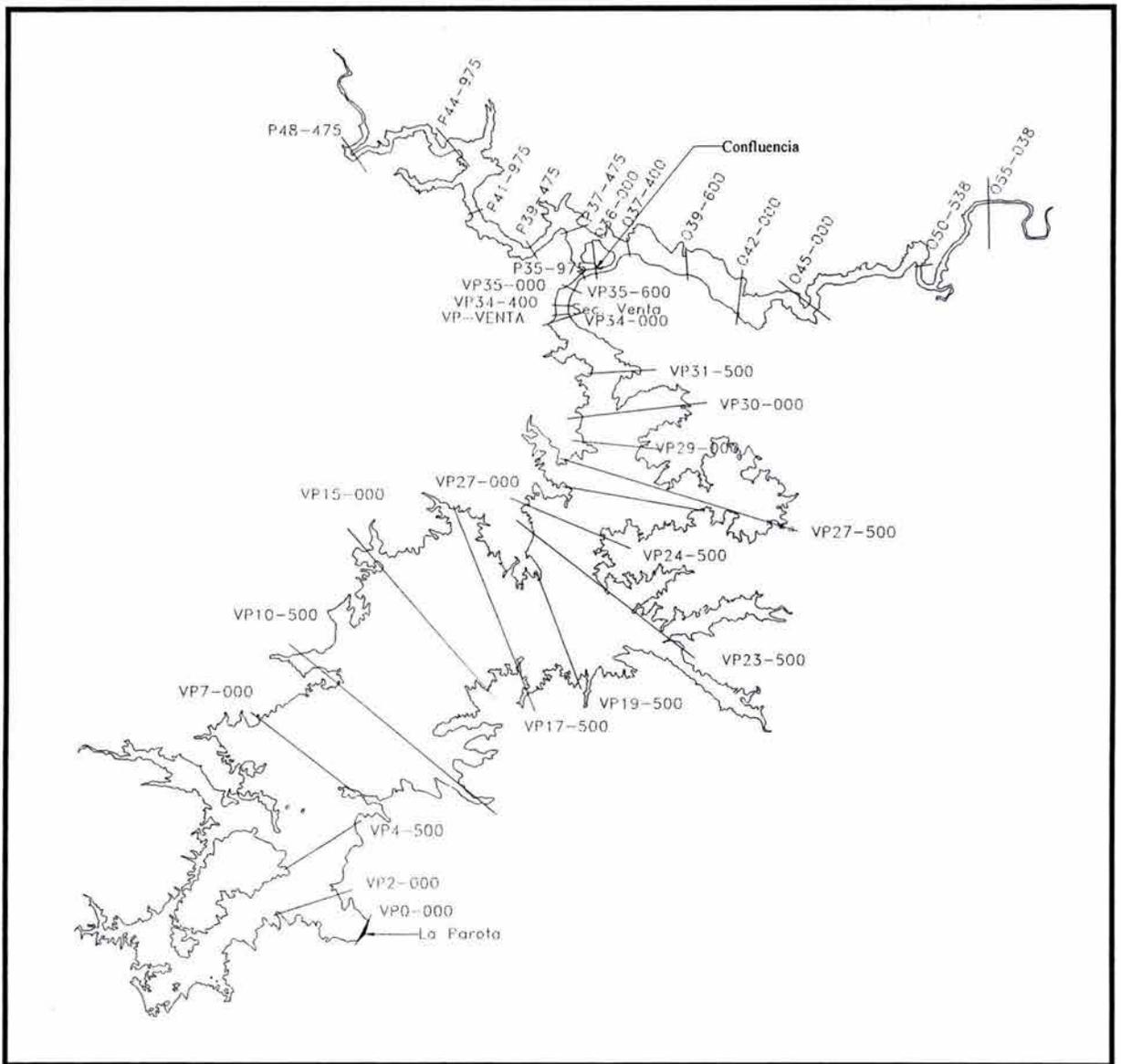


Figura 3.2 Planta del embalse y ubicación de las secciones transversales

3.2 Hidrodinámica del embalse

Para modelar la turbidez, es indispensable determinar la distribución de velocidades, esto es, establecer la hidrodinámica del agua dentro del embalse. Para calcular estas velocidades existen varios procedimientos que serán aplicables según sea el caso de que se trate (Kikkawa, 1978). En el P. H. La Parota se presentan condiciones muy especiales que hacen necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos; de la figura 3.2 donde se muestra una planta del embalse, se observa lo siguiente:

- 1) Por existir dos entradas principales al vaso y al suponer que la sección transversal es muy estrecha en relación con la longitud del cauce se puede considerar que el flujo es bidimensional en el sentido vertical.
- 2) En la zona de confluencia de los principales ríos de aporte, dado que el volumen almacenado es pequeño (subsección 3.1), como se mencionó antes, se puede suponer que el mezclado es completo y por lo tanto es posible considerar sólo una entrada de la turbidez, que será el promedio ponderado de las concentraciones de las dos corrientes respecto a los gastos, debido a que los dos afluentes tienen diferente magnitud de gasto.

Para el modelo hidrodinámico propuesto se hace la hipótesis de que la distribución de velocidades horizontales (U_x) en una sección transversal del embalse es uniforme. Otra consideración es que la velocidad vertical (U_y) depende de la variación del fondo como de las características de la sección transversal. Este tipo de modelo se emplea en [Kikkawa,1978], quien hace comprobaciones con mediciones en campo, justificando su empleo. Una ventaja adicional para el uso de este tipo de modelo es la posibilidad de lograr un modelo general cuasi - permanente, que permite simular el comportamiento del embalse con variaciones mensuales de la hidrodinámica, es decir, que mes a mes sea posible variar los gastos y las concentraciones de entrada. Generalmente esto no es posible hacerlo con otro tipo de modelos, por el gran tiempo de simulación que requieren.

3.2.1 Malla de cálculo

Según lo indicado en la subsección 3.1, se empleó la malla de cálculo mostrada en forma esquemática en la figura. 3.1. Dicha malla se fijó de acuerdo con el perfil longitudinal del vaso, ya que en esta dirección es donde ocurre principalmente el flujo, y está constituida por celdas cuyas dimensiones varían de 140 a 3500 m de largo por 5 m de altura. Las secciones fueron seleccionadas con Δx diferentes a lo largo del recorrido de los ríos, pero siempre respetando la condición de mantener el volumen del almacenamiento al NAMO, el número total de celdas utilizado es de 383. Las secciones transversales se determinaron según la discretización realizada en la subsección 3.1, cuyos valores se presentan en el apéndice E.

3.2.2 Manejo de la información de las secciones transversales

La lectura de los anchos de cada sección transversal se obtiene empleando el programa datos-venta-parota.mcd, donde para cada sección transversal se lee el ancho "B" a diferentes elevaciones. El programa lee para cada uno de los puntos de la malla de cálculo el valor correspondiente de "B", asignando en cada celda el valor $BA_{i,j}$ para los anchos que se consideran "Arriba" y $BAB_{i,j}$ "Abajo", para cada celda como se presenta en la figura 3.3.

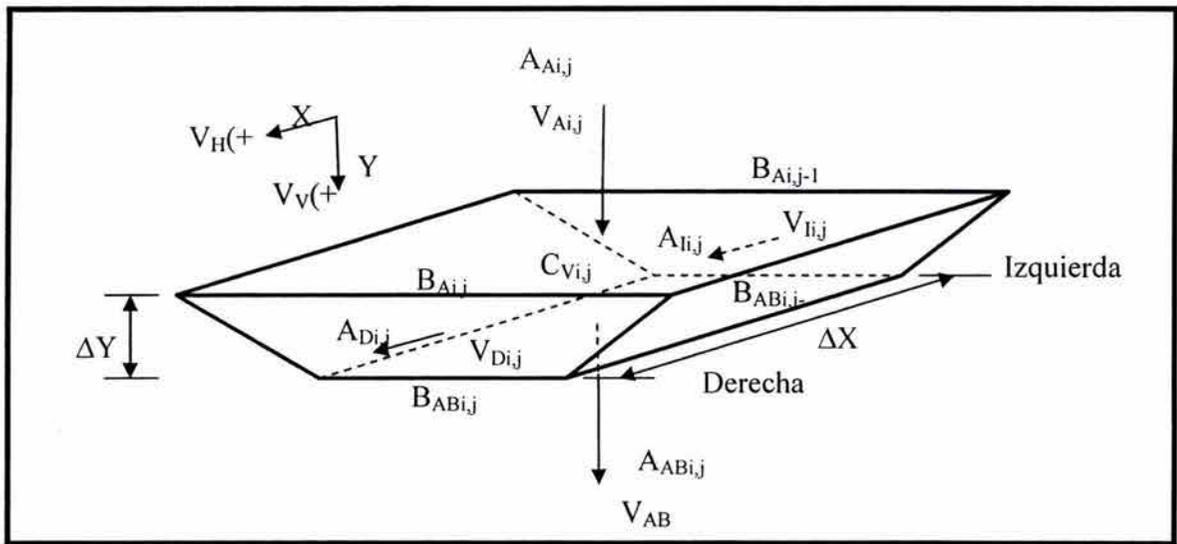


Figura 3.3 Esquema de la ubicación de anchos B y velocidades V en una celda

3.2.2.1 Cálculo de los anchos promedio

Una vez obtenidos los anchos característicos de cada sección el programa datos-venta-parota.mcd genera los anchos promedio de cada celda haciendo:

Para los anchos del lado derecho (figura 3.3)

$$BMD_{i,j} = \frac{BA_{i,j} + BAB_{i,j}}{2} \quad (3.1)$$

En el lado izquierdo

$$BMI_{i,j} = \frac{BA_{i,j-1} + BAB_{i,j-1}}{2} \quad (3.2)$$

Arriba

$$BMA_{i,j} = \frac{BA_{i,j} + BAB_{i,j}}{2} \quad (3.3)$$

Abajo

$$BMAB_{i,j} = \frac{BAB_{i,j} + BAB_{i,j-1}}{2} \quad (3.4)$$

Los resultados obtenidos con las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 para cada celda de la malla, se almacenan para posteriormente ser empleados en el programa que calcula las velocidades y la turbidez.

3.2.2.2 Áreas transversales

Empleando los anchos promedio de cada celda, se calculan las áreas de las secciones transversales para cada una de ellas (derecha, izquierda, arriba, abajo, según la figura 3.3) de la siguiente manera

Para el lado derecho:

$$AD_{i,j} = BMD_{i,j} \Delta y \quad (3.5)$$

Para el lado izquierdo:

$$AI_{i,j} = BMI_{i,j} \Delta y \quad (3.6)$$

Para arriba:

$$AA_{i,j} = BMA_{i,j} \Delta x \quad (3.7)$$

Para abajo:

$$AAB_{i,j} = BMAB_{i,j} \Delta x \quad (3.8)$$

Esto se realiza en el programa datos-venta-parota.mcd

3.2.3 Determinación de las velocidades

Dado lo estrecho de las secciones en relación a su longitud, para la determinación del patrón de velocidades dentro del vaso, se hace la hipótesis, como antes se indicó, de que el flujo se puede considerar bidimensional, por lo que las velocidades principales sólo serán en las direcciones horizontal y vertical.

3.2.3.1 Velocidades horizontales

Para la determinación de las velocidades horizontales, se empleó el criterio de Kikkawa [1978], donde se considera que la distribución de velocidades es notablemente uniforme, lo cual se justifica al emplear gastos medios mensuales, obtenidos a partir de la división de los datos de volumen escurrido de cada uno de los meses entre los días transcurridos de cada uno de ellos respetándose el volumen de agua que entra al embalse.

Se supone que en cada sección transversal se cumple la ecuación de continuidad para flujo permanente. Entonces, la velocidad media en la sección j (figura 3.3) es:

$$VMH_{i,j} = \frac{Q}{AT_j} \quad (3.9)$$

donde

Q gasto líquido en la sección j

AT área hidráulica para la cota del NAMO en la sección j

El gasto horizontal en la cara de cada celda será:

$$QHI_{i,j} = VHI_{i,j} AI_{i,j} \quad (3.10)$$

3.2.3.2 Velocidades verticales

La velocidad vertical abajo de cada celda, se calcula determinando primero los gastos de la manera siguiente:

Para el gasto vertical en la parte baja de la celda:

$$QVAB_{i,j} = -QHD_{i,j} + QHI_{i,j} + QVA_{i,j} \quad (3.11)$$

Por lo que las velocidades serán:

$$VVAB_{i,j} = \frac{QVAB_{i,j}}{AAB_{i,j}} \quad (3.12)$$

El gasto vertical arriba de cada celda se obtiene por medio de la ecuación 3.13:

$$QVA_{i+1,j} = QVAB_{i,j} \quad (3.13)$$

y la velocidad con:

$$VVA_{i+1,j} = \frac{QVA_{i+1,j}}{AA_{i+1,j}} \quad (3.14)$$

Es importante notar que la integración de los gastos y por ende las velocidades, se hace horizontalmente, de la cola del vaso hacia la cortina y de arriba hacia abajo para la integración vertical. Por lo tanto la convención de signos será la siguiente: positivo para las velocidades que van hacia la derecha y hacia abajo y negativo en caso contrario, como se indica en la figura 3.3.

3.3 Modelo numérico de concentración de sedimentos

Para calcular la evolución de la concentración del material en el vaso, se utiliza la teoría propuesta por Kikkawa [1978], basada en la teoría de la difusión y de la convección.

Conviene señalar que de acuerdo con la información de las temperaturas en el sitio, durante el año ésta varía entre los 17°C y los 27 °C con una oscilación diaria entre los 2°C y los 4°C, por lo que no justifica usar la consideración de la posible estratificación del embalse por temperaturas (para los estudios de sedimento).

3.3.1 Ecuación general de transporte de sedimentos en diferencias finitas

La ecuación general de transporte de sedimentos, ecuación 2.6, expresada en diferencias finitas resulta de la siguiente forma:

Expresando la derivada con respecto al tiempo empleando diferencias hacia delante, se tiene:

$$\frac{c^{n+1}_{i,j} - c^n_{i,j}}{\Delta t} + U_x \frac{\partial c}{\partial x} + U_y \frac{\partial c}{\partial y} - \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + w \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.15)$$

Donde los superíndices n+1 y n, se refieren al concentración en la celda i, j para el tiempo (n+1)Δt y (n)Δt respectivamente, con lo anterior se tiene un esquema de diferencias finitas explícito:

$$c^{n+1}_{i,j} = c^n_{i,j} - U_x \frac{\partial c}{\partial x} \Delta t - U_y \frac{\partial c}{\partial y} \Delta t + \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \Delta t - w \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) \Delta t \quad (3.16)$$

Los términos de la ecuación 3.16, se definen de la manera siguiente:

$$CN = c^{n+1} \quad (3.17)$$

$$CV = c^n \quad (3.18)$$

$$CX = -U_x \frac{\partial c}{\partial x} \Delta t \quad (3.19)$$

$$CY = -U_y \frac{\partial c}{\partial y} \Delta t \quad (3.20)$$

$$CA = -w \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) \Delta t \quad (3.21)$$

$$CD = \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \Delta t \quad (3.22)$$

Con las ecuaciones 3.17 a la 3.22, la 3.16 queda:

$$CN_{i,j} = CV_{i,j} + CX_{i,j} + CY_{i,j} + CA_{i,j} + CD_{i,j} \quad (3.23)$$

La ecuación 3.23 permite conocer la concentración en la celda i, j en el tiempo $(n+1)\Delta t$ a partir de evaluar los términos CX , CY , CA y CD como a continuación se presenta, donde dichos términos se evalúan con ayuda de un esquema de diferencias finitas.

La nomenclatura para las concentraciones es:

$CN_{i,j}$ Concentración final

$CV_{i,j}$ Concentración inicial

$CX_{i,j}$ Concentración por convección en la dirección "x"

$CY_{i,j}$ Concentración por convección en la dirección "y"

$CA_{i,j}$ Concentración por sedimentación

$CD_{i,j}$ Concentración por difusión.

Empleando la figura 3.3, las ecuaciones para calcular los diferentes términos de la ecuación 3.23 son:

I) Convección en la dirección "x"

a) Cuando las velocidades $VI_{i,j}$ y $VD_{i,j}$ son positivas:

$$CX_{i,j} = \frac{(CV_{i,j-1}BI_{i,j}VI_{i,j} - CV_{i,j}BD_{i,j}VD_{i,j})\Delta t}{(BD_{i,j} + BI_{i,j})\Delta x} \quad (3.24)$$

2

II) Convección en la dirección "y"

a) Cuando las velocidades $VA_{i,j}$ y $VAB_{i,j}$ son positivas:

$$CY_{i,j} = \frac{(-CV_{i,j}BAB_{i,j}VAB_{i,j} + CV_{i-1,j}BA_{i,j}VA_{i,j})\Delta t}{\frac{(BA_{i,j} + BAB_{i,j})\Delta y}{2}} \quad (3.25)$$

b) Cuando las velocidades $VA_{i,j}$ y $VAB_{i,j}$ son negativas:

$$CY_{i,j} = \frac{(-CV_{i+1,j}BAB_{i,j}VAB_{i,j} + CV_{i,j}BA_{i,j}VA_{i,j})\Delta t}{\frac{(BA_{i,j} + BAB_{i,j})\Delta y}{2}} \quad (3.26)$$

c) Cuando la velocidad $VA_{i,j}$ es positiva y la velocidad $VAB_{i,j}$ es negativa

$$CY_{i,j} = \frac{(-CV_{i+1,j}BAB_{i,j}VAB_{i,j} + CV_{i-1,j}BA_{i,j}VA_{i,j})\Delta t}{\frac{(BA_{i,j} + BAB_{i,j})\Delta y}{2}} \quad (3.27)$$

d) Cuando la velocidad $VA_{i,j}$ es negativa y la velocidad $VAB_{i,j}$ es positiva

$$CY_{i,j} = \frac{(-CV_{i,j}BAB_{i,j}VAB_{i,j} + CV_{i,j}BA_{i,j}VA_{i,j})\Delta t}{\frac{(BA_{i,j} + BAB_{i,j})\Delta y}{2}} \quad (3.28)$$

III) Difusión

$$CD_{i,j} = \frac{(CV_{i-1,j} - CV_{i,j})BA_{i,j}\alpha_{i,j}\Delta t}{\frac{(BA_{i,j} + BAB_{i,j})\Delta y^2}{2}} - \frac{(CV_{i,j} - CV_{i+1,j})BBA_{i,j}\alpha_{i,j}\Delta t}{\frac{(BA_{i,j} + BAB_{i,j})\Delta y^2}{2}} \quad (3.29)$$

donde $\alpha_{i,j}$ es el coeficiente de difusión.

IV) Sedimentación del material sólido

$$CA_{i,j} = \frac{(CV_{i-1,j}BA_{i,j} - CV_{i,j}BAB_{i,j})\omega_0\Delta t}{(BA_{i,j} + BAB_{i,j} + BD_{i,j} + BI_{i,j})\Delta y} + \frac{CV_{i,j}(-BA_{i,j} + BAB_{i,j})\omega_0\Delta t}{(BA_{i,j} + BAB_{i,j} + BD_{i,j} + BI_{i,j})\Delta y} \quad (3.30)$$

donde ω_0 es la velocidad de caída del material que entra en el vaso.

Nótese que en la ecuación 3.30 la cantidad de material que se deposita en el fondo se puede expresar como concentración y en peso (kg), utilizando las ecuaciones 3.31 y 3.32 respectivamente:

$$DEPOSI_{i,j} = \frac{-CV_{i,j}(BA_{i,j} + BAB_{i,j})\omega_0\Delta t}{(BA_{i,j} + BAB_{i,j} + BD_{i,j} + BI_{i,j})\Delta y} \quad (3.31)$$

$$PEDP_{i,j} = -CV_{i,j}(BA_{i,j} - BAB_{i,j})\Delta x\omega_0\Delta t \quad (3.32)$$

Como se indicó al inicio de este inciso, el valor de la nueva concentración en cada celda estará dado por la ecuación 3.23.

La cantidad de material almacenado en cada celda (en kg) se calcula por medio de la ecuación 3.33:

$$PCEL_{i,j} = \frac{CN_{i,j}\Delta x\Delta y(BA_{i,j} + BAB_{i,j} + BD_{i,j} + BI_{i,j})}{4} \quad (3.33)$$

En términos generales, el procedimiento de solución consistirá en resolver la ecuación general de la concentración (ecuación 3.23), para cada celda en cada Δt hasta finalizar el periodo de modelación deseado. En el siguiente capítulo se detalla la manera como se integra todo el procedimiento del cálculo de la concentración de sedimentos.

3.3.2 Coeficiente de difusión

El valor del coeficiente de difusión vertical ($\alpha_{i,j}$) es un aspecto muy importante que se debe definir, para ello se recurrió a las referencias existentes en la literatura sobre el tema.

Así como parte de la masa se transporta por medio del movimiento molecular aleatorio, la materia es mezclada por vórtices de mayor escala en lagos. Si es suficiente el tiempo de observación y se emplean las escalas adecuadas, este movimiento se puede ver como aleatorio y tratado matemáticamente como un proceso de difusión, por lo cual, las ecuaciones desarrolladas para el movimiento molecular pueden ser utilizadas para caracterizar el transporte masivo turbulento.

Se presentan dos diferencias importantes, primero, debido a que los vórtices son mucho más grandes que el avance aleatorio de las moléculas, el mezclado por la difusión turbulenta es mucho mayor que el debido a la molecular.

Como se muestra en la figura 3.4, los coeficientes turbulentos de difusión son de varios órdenes de magnitud mayores que en una escala molecular. Nótese también que la difusión horizontal en lagos es generalmente mucho mayor que la difusión vertical.

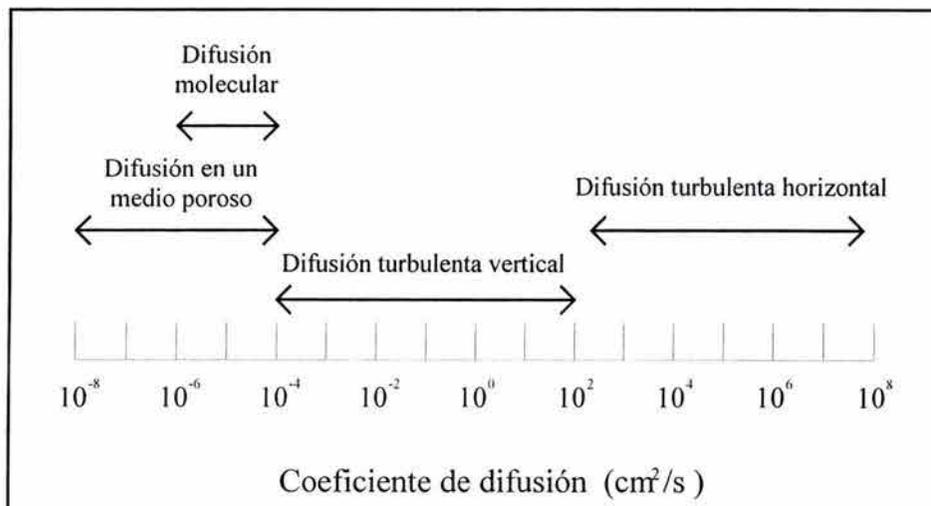


Figura 3.4 Rangos típicos del coeficiente de difusión

La segunda diferencia, en contraste con la difusión molecular, radica en que la turbulencia comprende una gran variedad de tamaños de vórtices; así, se esperaría que la difusión resultante sea dependiente de la escala de los mismos.

Generalmente se ha demostrado que el coeficiente turbulento de difusión, que se designó como $\alpha_{i,j}$, varía con un exponente de 4/3 de la escala del fenómeno (Richardson 1926). Esta relación es apoyada por observaciones realizadas en el mar y en el lago Ontario figura 3.5

La dependencia de la escala de difusión de los vórtices tiene gran consecuencia práctica al modelar el transporte de contaminantes en lagos. Para los casos donde un contaminante se descarga rápidamente en un área pequeña (por ejemplo, un derrame), la difusión de la nube resultante se acelera conforme la nube crece.

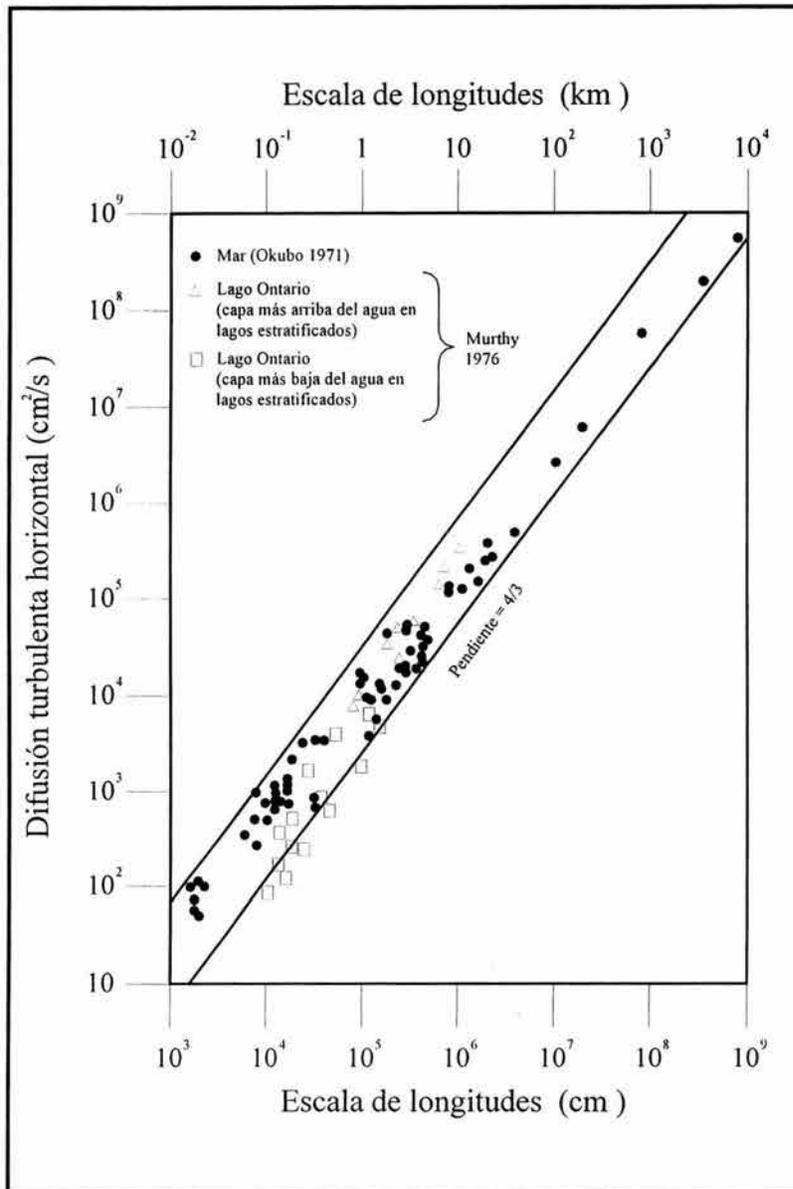


Figura 3.5 Relación de la difusión horizontal y la escala de longitud en el mar y en el lago Ontario. Las líneas definen una envolvente alrededor de datos del mar con pendiente de 4/3 (Okubo 1971)

Debido a lo antes mencionado, no es posible determinar de manera precisa el valor del coeficiente de difusión, por lo cual en este trabajo se propone emplear en la modelación tres valores diferentes del coeficiente siendo éstos: $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ y $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$.

4. DATOS DEL P.H. LA PAROTA

4.1. Ubicación geográfica

La cuenca del río Papagayo se encuentra entre los 16° 41' y los 17° 37' de latitud norte y de los 98° 37' a los 100° 05' de longitud oeste; queda ubicada completamente dentro del Estado de Guerrero y abarca los Municipios de Chilpancingo, Mochitlán, Quechultenango, Acapulco, San Marcos y Tecuanapa.

La corriente formadora de mayor desarrollo del río se origina en la Sierra Madre del Sur, a 3000 m de altitud (al oriente del cerro Yohualatlaxco) y a unos 6 km al oeste de Omiltemi, Gro. donde recibe el nombre de río Petaquillas. Corre de oeste a este hacia Chilpancingo y recibe la aportación de torrentes que sufren una primera regularización en una pequeña presa llamada Cerrito Azul, localizada 3 km al norte de Chilpancingo, Gro., posteriormente continúa un tramo con rumbo sureste en el que la corriente se conoce como río Huacapa, la cual recorre las poblaciones de Chilpancingo, Petaquillas,

Mochitlán, Quechultenango y Colotlipa, en donde la Comisión Federal de Electricidad (CFE) construyó, en el año de 1946, una presa para desviar aguas a un canal que las lleva a una planta para generación de energía. Después de la presa, el río cambia su dirección hacia el Sur hasta la Villa de Xicuiltepec y en este tramo, se le conoce con el nombre de río Azul.

En Xicuiltepec, el río Azul recibe por la izquierda un afluente muy importante llamado río Temixco o río Unión que se origina en las montañas tlapanecas, donde se forman dos afluentes principales: uno que baja desde cerca de Zapotitlán hacia el sur y otro que viene desde Malinaltepec hacia el suroeste. Estos ríos se reúnen a la altura de Caxitepec y ya juntos, siguen al Oeste para unirse con el río Azul, en el poblado de Xicuiltepec.

Las dos corrientes continúan hacia el Oeste por unos 20 km más a través de una garganta estrecha y sinuosa, donde por la margen derecha, el afluente recibe el nombre de río Chapalapa que baja directamente de norte a sur, desde Mazatlán hasta Calpantepec, Gro. Hacia el Oeste por unos 35 km, continúa la corriente pero en este trayecto se le conoce ya como río Omitlán. A esa altura y provenientes de la parte noroccidental de la cuenca llegan, por la margen derecha, las aportaciones de los ríos San Miguel, Carrizal y Potrero que vienen desde el Oeste, Noroeste y Norte, respectivamente. Estas corrientes entran al río Omitlán ya juntas como río Papagayo. A partir de esta confluencia, el río Papagayo impone su nombre y continúa hacia el sur, recibiendo aportaciones secundarias por una y otra margen. De la última confluencia mencionada hasta su desembocadura, el río corre hacia el sur por unos 70 km para desembocar en el Océano Pacífico, a la altura de Barra Bermeja.

En el año de 1963, la CFE construyó la Presa de La Venta, aguas abajo de la confluencia del Omitlán con el Papagayo.

La importancia del río Papagayo se refleja en la existencia de información hidrométrica en su cuenca de ocho estaciones. La primera, sobre el río Azul, llamada Colotlipa situada aguas abajo de la presa derivadora, operada por la CFE desde enero de 1947 y que dejó de funcionar en octubre de 1970.

Sobre el río Omitlán, se encuentra la estación hidrométrica El Puente, situada unos 8 km aguas abajo de la confluencia con el río Chapalapa, que es operada por la CFE desde enero de 1953, y a la fecha sigue operando.

Existía una tercera estación sobre el río Omitlán, ya muy cerca de la confluencia con el Papagayo su nombre era El Salitre y dependía también de CFE, allí se realizaron mediciones desde octubre de 1949 hasta julio de 1963, desapareciendo al quedar inundada por el vaso de la presa La Venta.

En la figura 4.1 se observa un plano general de localización de la zona en estudio, así como de sus principales corrientes de aporte y en la figura 4.2 se muestran los perfiles del vaso.

Es importante notar que la cortina del P. H. La Venta quedará sumergida en el vaso que formará el P. H. La Parota.

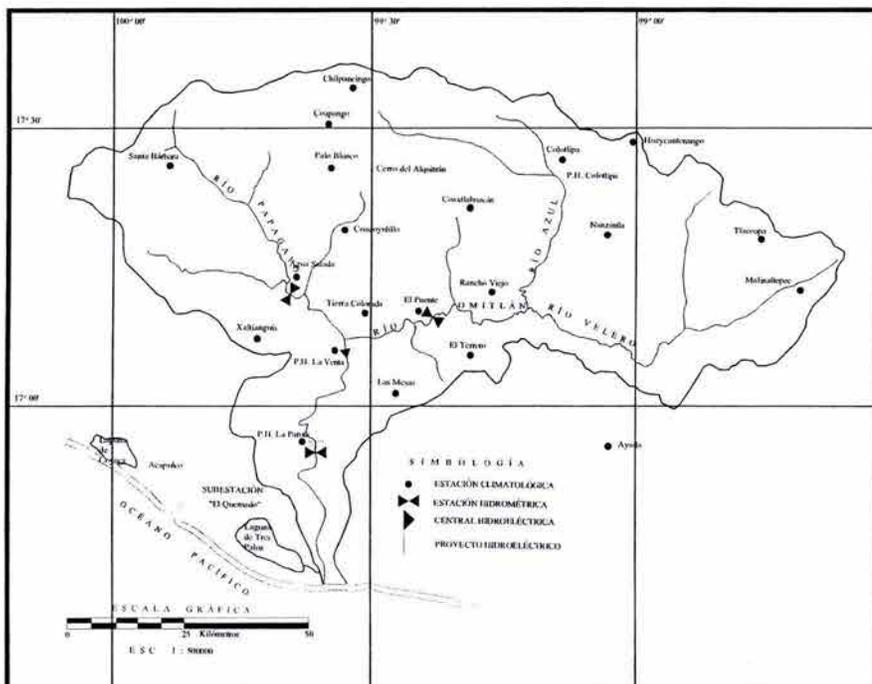


Figura. 4.1 Esquema general de la cuenca y corrientes de aporte

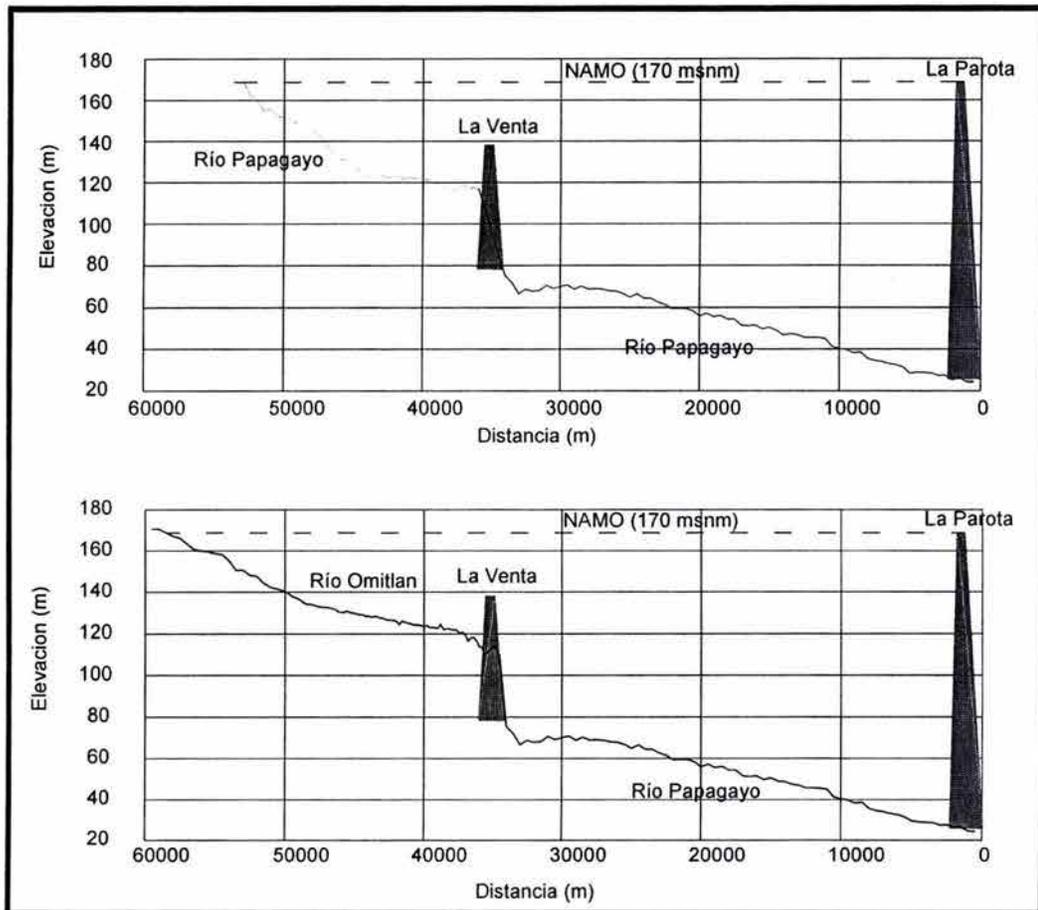


Figura. 4.2 Perfiles de los ríos Omítlán y Papagayo

Sobre la margen derecha del Papagayo existe información hidrométrica de tres estaciones: una pertenece a la estación hidrométrica San Cristóbal, sobre el río San Miguel, en el Municipio de Chilpancingo, la cual operó desde mayo de 1966 a diciembre de 1968, por cuenta de la entonces llamada Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Las otras dos, con nombres de Agua Salada y Papagayo (ambas de CFE), se encuentran aguas arriba de la confluencia del río Papagayo con el Omítlán, y sus periodos respectivos de información van de agosto de 1968 a diciembre de 2001 y de junio de 1955 a agosto de 1964, respectivamente. La estación hidrométrica Agua Salada sigue activa mientras que la estación Papagayo dejó de operar al quedar dentro del vaso de la presa La Venta en septiembre de 1964.

Entre la confluencia del río Omitlán y su desembocadura al mar, existe información de dos estaciones hidrométricas: una se llama La Venta, que funcionó de octubre de 1963 a octubre de 1976 y su funcionamiento estuvo a cargo de la CFE, siendo su objetivo conocer las extracciones del vaso La Venta; la otra es La Parota operada por CFE en previsión de un posible aprovechamiento en ese sitio y su periodo de información es de abril de 1962 a la fecha, la estación sigue activa.

Las características generales de las estaciones localizadas en la cuenca se resumen en la tabla 4.1

Tabla 4.1. Estaciones hidrométricas en la cuenca del Río Papagayo

Estación Hidrométrica	Coordenadas		Altitud	Periodo de información	Área drenada (km ²)	Estado de la estación
	Latitud	Longitud				
Colotlipa	17°24'30"	99°10'30"	838.45	Enero 1947 - Octubre 1970	812	Suspendida
El Puente	17°08'53"	99°24'53"	191.89	Enero 1953 - Diciembre 2001	4016	Activa
El Salitre	17°08'00"	99°32'45"	124.58	Octubre 1949 - Julio 1963	4277	Suspendida
San Cristóbal	17°16'45"	99°56'30"	124.58	Mayo 1966 - Diciembre de 1968	233	Suspendida
Agua Salada	17°10'43"	99°37'52"	191.67	Agosto 1968 - Diciembre 2001	1960	Activa
Papagayo	17°09'15"	99°35'30"	148.43	Junio 1955 - Agosto 1964	2184	Suspendida
La Venta	17°06'15"	99°33'30"	98.56	Octubre 1963 - Octubre 1976	6509	Suspendida
La Parota	16°55'45"	99°37'30"	93.62	Abril 1962 - Diciembre 2001	7067	Activa

Es importante mencionar que el área del Papagayo hasta su confluencia con el Omitlán, es de aproximadamente 2269 km²; el área del Omitlán hasta su confluencia con el Papagayo, es de alrededor de 4237 km² y el área total de la cuenca del río Papagayo y el Omitlán más el área de la cuenca propia del P. H. La Parota, es aproximadamente de 7100 km².

4.2 Características del embalse

En la figura 4.3, se presenta el plano general del embalse, el cual tiene una longitud máxima de inundación de 18 km sobre el río Papagayo (desde La Parota) y de 24 km sobre el río Omitlán a partir de la confluencia, considerando la cota del NAMO [170 msnm, información PUMA, 2003]. En el trabajo presentado por CFE, 2003a, se indica un valor alternativo para el NAMO en el nivel 175 msnm.

Los datos más importantes del embalse, reportados en CFE, 2003b, para los fines del presente trabajo son los siguientes:

- a) Capacidad al NAMO: $5800 \times 10^6 \text{ m}^3$
- b) Capacidad al NAME: $7100 \times 10^6 \text{ m}^3$

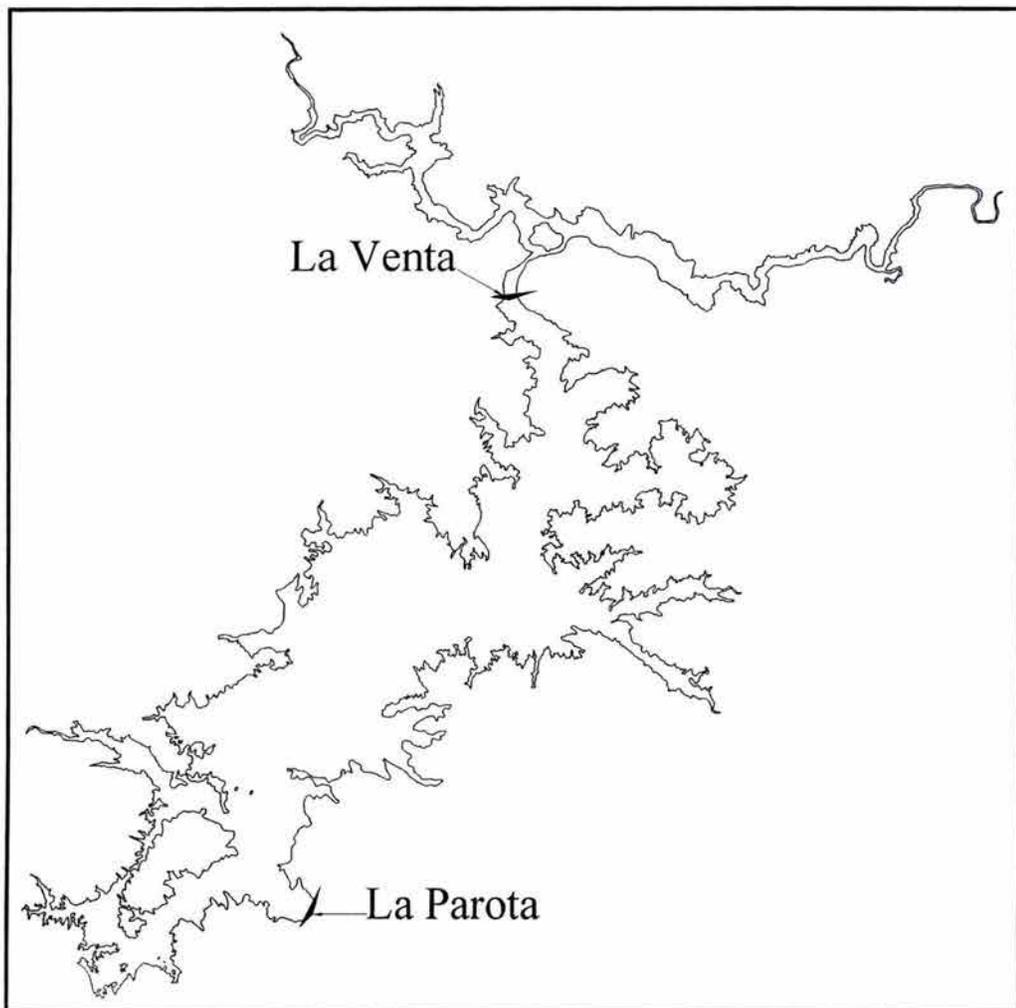


Figura. 4.3 Plano general del embalse

4.3 Batimetría del embalse

La batimetría del embalse fue obtenida de los planos disponibles en la página del PUMA, 2003. Estos planos están en archivos de AUTOCAD (cartas de INEGI) con curvas de nivel a cada 20 m, además de secciones transversales en las colas del embalse.

4.4 Gastos líquidos de entrada

La información hidrométrica empleada se obtuvo del trabajo presentado por Mora *et al*, 2002, donde se muestran los volúmenes de escurrimiento y el transporte sólido anual, así como también para períodos mensuales. Las estaciones consideradas fueron Papagayo, Omitlán y La Parota. Cabe destacar que en la zona de estudio la época de avenidas ocurre principalmente en el período comprendido entre los meses de mayo a octubre.

En la tabla 4.2 se muestran los valores medios mensuales de los escurrimientos líquidos. Los datos del río Papagayo se obtuvieron de la estación “Agua Salada” (1969 – 2001) y los del Omitlán de la estación “El Puente” (1967 -2001). La información disponible de la estación “La Parota” comprendió de 1962 a 2001. Los gastos medios mensuales de entrada se presentan en la figura 4.4

Tabla 4.2 Datos de gastos medios mensuales.

MES	GASTO (m ³ /s)
Enero	48
Febrero	35
Marzo	25
Abril	20
Mayo	20
Junio	80
Julio	175
Agosto	265
Septiembre	453
Octubre	280
Noviembre	110
Diciembre	65

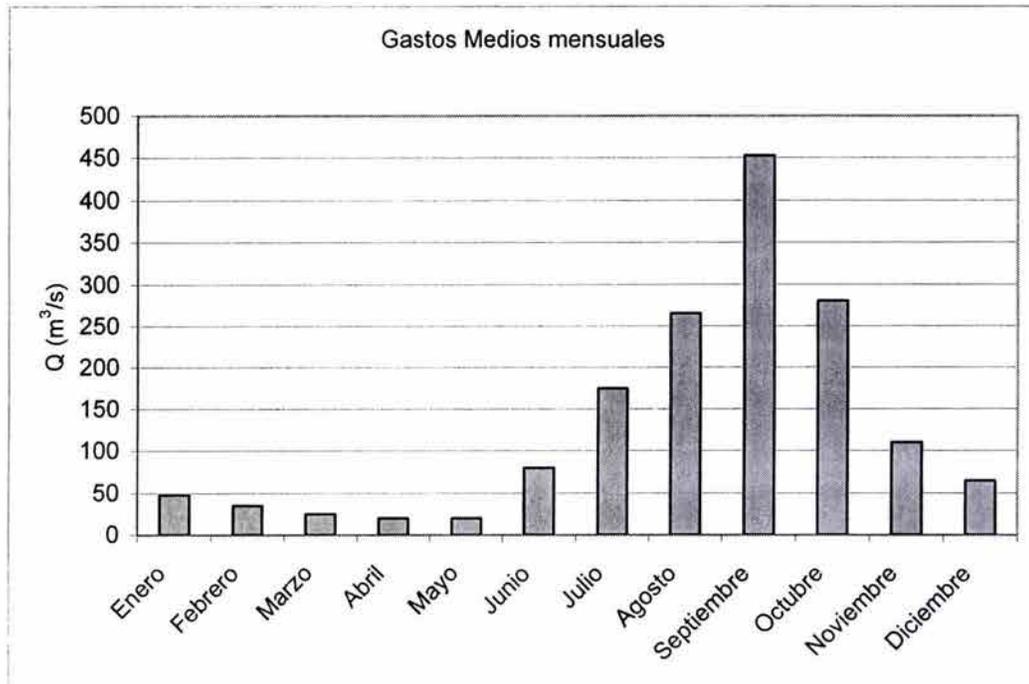


Figura. 4.4 Gastos medios mensuales

4.5 Aporte de sedimentos

Se entiende por aporte de sedimentos al total de partículas de suelo y roca que se encuentran en la cuenca, y que son transportadas por una corriente [Gracia *et al*, 1992]. El sedimento se clasifica atendiendo a su origen en dos grupos: de lavado y de fondo. El primero corresponde al material de lavado de la cuenca y lo componen los limos y arcillas desplazados fácilmente en suspensión y el segundo a aquellos materiales presentes en el fondo del cauce, cuyo diámetro es mayor a 0.062 mm, llevados en suspensión en el cuerpo de la corriente o por el fondo del cauce, rodando o en saltación.

La diferencia principal entre el comportamiento del material del fondo y el de lavado, consiste en que el transporte de fondo, depende de las características geométricas e hidráulicas de la sección del río y la morfología del material, pudiéndose cuantificar por medios analíticos; en cambio, el transporte de material de lavado, depende de la cantidad de partículas finas que la cuenca aporta al río bajo la acción de una lluvia; o bien, proviene en ocasiones de la erosión que el mismo río produce en sus márgenes y como no es función de las características hidráulicas de la corriente, solo se puede valorar cuando

se toma una muestra de agua con partículas en suspensión, separando la porción de partículas que no están representadas en la curva granulométrica del material de fondo.

Con el fin de evaluar el aporte de sedimentos que llegan a la desembocadura del río Papagayo se consideró sólo el aporte de finos en suspensión (material de lavado) transportado en el cauce.

Para el material de lavado, la referencia de Mora *et al*, proporcionó datos de muestras tomadas en forma superficial desde la canastilla de aforos en tres lugares de la sección transversal del río, dichas muestras eran recolectadas en botellas con al menos 800 mililitros de agua cada una.

Para determinar el peso del material de lavado se dejó que el material de fondo de las muestras se sedimentara, después, el líquido de las botellas se filtró a través de la malla 200 vaciándolo posteriormente en una cápsula de porcelana para secarla en un horno y obtener el peso correspondiente al material de lavado.

Conocido el peso del material de lavado y el volumen de agua que escurrió durante el día que se tomó la muestra, se calculó el gasto diario de material total de lavado que pasó por la estación, expresado en kg/m^3 .

En la tabla 4.3 se resume la información de material de lavado de la estación hidrométrica la Parota, que a partir del año de 1977 en que se comenzó a tomar muestras de sedimentos. La tabla se encuentra dividida en dos periodos, en el primero, se calculó el material de lavado como la totalidad de las muestras obtenidas en las botellas, mientras que en el segundo período, se considera el material de lavado, sólo aquel que pasó la malla 200. En ésta tabla se resume el promedio mensual del material de lavado del periodo de 1987 a 2001 y se observa que los meses que corresponden al periodo de lluvias son los que aportan la mayor cantidad de material, el promedio anual de material de lavado que pasa por la estación es de aproximadamente 7 millones de toneladas.

4.6 Sólidos transportados por las corrientes

En la figura 4.5 se muestran los valores medios mensuales de las concentraciones de material de entrada al vaso.

Se debe tener en cuenta que la información reportada, no tiene suficiente detalle sobre el material medido, ya que en la información disponible se indica que sólo desde el año 1977, se mide el material que pasa la malla 200. Esto ocasiona que no se pueda separar el material que posiblemente sea sedimentable cuando se retiene mucho tiempo en el embalse del que no es sedimentable bajo ninguna circunstancia, aunque se tenga en retención durante un periodo largo de tiempo, esto último, se debe a la incidencia de factores químicos y biológicos.

Como se mencionó con anterioridad del trabajo de Gracia *et al* [1992a] se observa la conveniencia de usar para el material fácilmente sedimentable una velocidad máxima de caída de $\omega_0 = 0.0003$ m/s. En tanto que para el material no sedimentable $\omega_0 = 1 \times 10^{-12}$ m/s. Para este trabajo se propone emplear los mismos criterios debido a la incertidumbre de los datos de concentraciones registrados.

Las concentraciones medias mensuales se obtuvieron de la división de los volúmenes de sedimento mensuales mostrados en la tabla 4.3 entre el volumen de escurrimiento correspondiente a cada mes y se presentan en la figura 4.5.

Tabla 4.3 Datos del material de lavado de la estación de La Parota

MATERIAL DE LAVADO EN TONELADAS

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1977	0	0	7561	1725	0	154798	270191	287449	1791775	499725	3317	2304	3018845
1978	4807	2717	1766	1810	2308	582063	2179474	665171	1085928	816517	130096	49993	5522650
1979	4207	5689	8946	0	12727	19775	191004	2348204	1611373	73812	0	0	4275737
1980	0	0	3097	0	0	8448	54707	1603785	1814619	300245	13638	0	3798539
1981	0	0	0	6564	0	641057	935240	3413890	3486049	1715666	92887	0	10291353
1982	0	0	0	6564	0	641057	935240	3413890	3486049	1715666	92887	0	10291353
1983	0	0	0	0	0	129140	1055555	223250	1073929	170343	0	6658	2658875
1984	0	0	0	0	436	816917	1247246	2135033	7525317	515898	0	0	12240847
1985	0	0	0	0	0	878705	1823789	4320003	2103837	238716	0	0	9365050
1986	0	0	0	0	0	852444	491383						
1987	0	0	0	0	7268	199450							
Media	819.5	764.2	1942.7	1514.8	2067.2	447623.1	918382.9	2045630.6	2664319.6	671843.1	36980.6	6550.6	6829249.9
1987													
1988	584.1	1419.9	0	0	0	831527.3	1950846.4	1819485.8	2163635.6	158960.7	13079.6	0	6939539.4
1989	0	0	0	0	0	2885315.8	1182228.6	1438248.2	4002651.8	676033.1	0	0	10184477.5
1990	0	0	0	0	6513.3	56598.9	3661610.7	866372.7	334088	343730.7	49938.6	0	5318852.9
1991	0	0	0	3788.6	0	246743.8	781956.4	323609.2	2726467.3	1828850.2	26391.2	0	5937806.8
1992	0	2671.5	0	0	56022.9	51558.3	263360	906382.6	1860741.6	692833.9	68875	3540	3905985.8
1993	0	0	0	0	0	1367764.8	3832478.4	1434083.6	3872858	273545	48465.7	0	10829195.5
1994	0	0	0	20329.4	13908.3	83486.7	271372.8	2046985.3	1088947.8	2315373.4	32728.3	4811.6	5877943.5
1995	0	0	0	0	53690.3	902586.4	2170820.9	3093523.1	2107381.5	445640.1	23199.2	5138.6	8801980.1
1996	0	0	0	0	46428.6	715796.2	886441.2	1584951.4	917276.9	2161000.5	16839.7	2125.8	6330860.3
1997	0	0	0	0	38292.5	139294.2	1407991.4	88118.3	2605694	3616395.5	15281.6	2785.5	7913853
1998	0	0	0	0	0	43516.9	255534	928433.8	4031816.2	2040609.9	61707.2	4103	7365721.1
1999	0	0	0	0	0	111679.1	1103301.3	3437833.7	1841234.7	1343017.3	58580.5	7062	7902708.4
2000	4611.7	2639.4	2528.1	0	10721.3	446276.4	1101695.2	1272627.2	1792478.8	213898	168043.8	2305.3	5017825.1
2001	0	0	0	0	0	253322.8	2128744.7	1172033.5	1566122.6	422742.9	89340.2	0	5632306.7
Media	371.1	480.8	180.6	1722.7	16112.7	581104.8	1499884.4	1458049.2	2207956.8	1180902.2	44924.6	2185.6	6997075.4

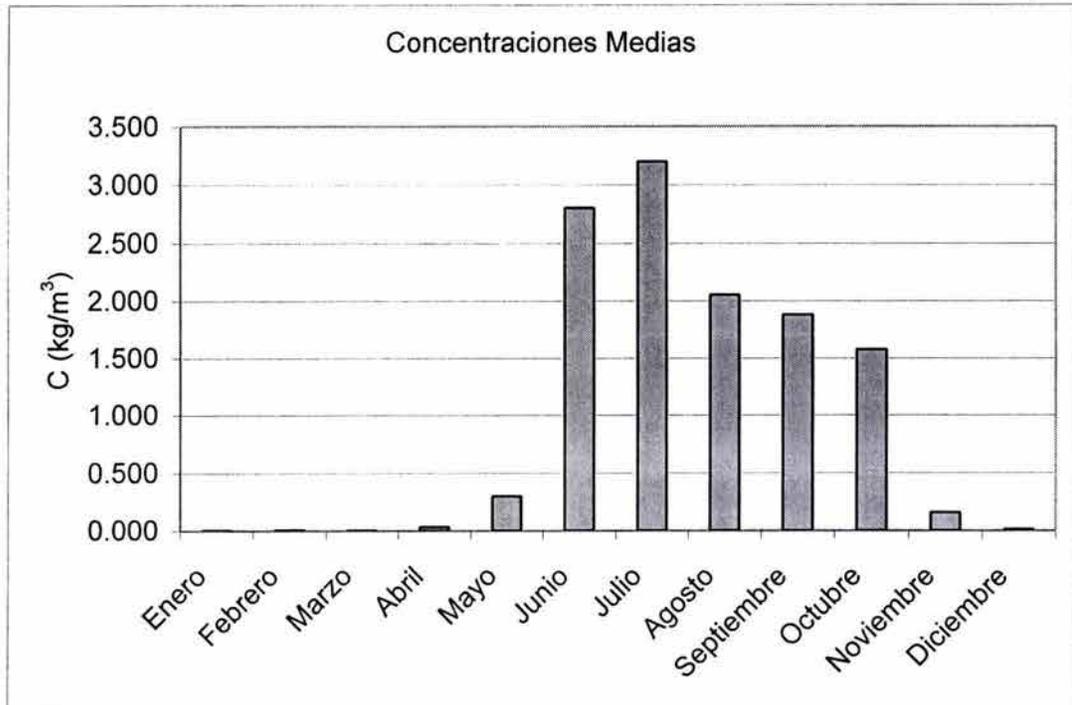


Figura. 4.5 Concentraciones medias mensuales

En la tabla 4.4 se presenta el resumen de las concentraciones medias mensuales aportadas al embalse del P.H. La Parota utilizadas para el análisis.

Tabla 4.4 Concentraciones mensuales

Mes	Concentración (kg/m³)
Enero	0.003
Febrero	0.005
Marzo	0.003
Abril	0.033
Mayo	0.301
Junio	2.802
Julio	3.200
Agosto	2.054
Septiembre	1.880
Octubre	1.575
Noviembre	0.158
Diciembre	0.013

De acuerdo con los datos presentados en la tabla anterior, se aprecia que las concentraciones varían de 0.003 a 3.2 kg/m³ en términos generales.

En Iwasa y Matsuo [1981] se informa que la turbidez en los embalses estudiados oscila alrededor de 0.001 kg/m³; por otra parte, Naomura y Aki [1976] señalan que la turbidez puede tener valores altos de 0.6 kg/m³, aunque los valores comunes son de 0.2 kg/m³; sin embargo, puede llegar hasta 0.9 kg/m³. Es evidente que los datos anteriores corresponden a casos particulares, pero son una buena muestra de los rangos esperados en cuanto a turbidez.

De lo mencionado en el párrafo anterior se puede decir que se haciendo una comparación de las concentraciones de entrada al embalse y los niveles de turbidez es de suponerse que al vaso entrará sedimento con velocidades de sedimentación radicalmente diferentes.

Una vez establecidos los rangos posibles de variación de concentraciones para turbidez, ahora el problema estriba en definir las velocidades de caída de ambos materiales y su diámetro representativo, D_m .

La primera consideración que podría hacerse sería la de emplear la velocidad $\omega_0 = 0.0003$ m/s, que es una velocidad límite superior, por lo que para las partículas reales deberá ser menor. Acudiendo a la información de Pin-nam *et al* [1983], se encontró que para $D_m = 0.0043$ mm la velocidad de caída oscila entre 0.00129 y 0.0015 m/s. En la gráfica de Rubey mostrada en Maza [1990], el cual es un criterio comúnmente empleado en problemas de hidráulica fluvial, para determinar la velocidad de caída de las partículas sólidas, indica como límite inferior de toda la gráfica a $D_m = 0.01$ mm con $\omega_0 = 0.0001$ m/s, en donde se observó que para valores mayores de D_m , la velocidad de caída es menor.

En Metcalf [1991] se presenta una clasificación de partículas sólidas que considera que las partículas con $D_m < 1 \times 10^{-6}$ mm, son sólidos disueltos, con 1×10^{-6} mm $< D_m < 0.01$ mm, generalmente son coloidales que eventualmente pueden ser removidos por coagulación, y para $D_m > 0.01$ mm, son sólidos sedimentables.

Dada la calidad de información existente, se decidió emplear los datos y concentraciones promedio, para realizar las simulaciones numéricas. Es evidente que en la medida que se disponga de información más detallada sobre el aporte de sedimento y gastos será posible realizar nuevas simulaciones.

Los volúmenes anuales de material sólido fino entrante son $6.25 \times 10^6 \text{ m}^3$ (6,997,075 ton/1.12 ton/m³ = $6.25 \times 10^6 \text{ m}^3$, Mora et al, 2002), y de $5.41 \times 10^6 \text{ m}^3$ (CFE, 2003a). Del material grueso la referencia de CFE, 2003a, reporta $14.07 \times 10^6 \text{ m}^3$.

4.7 Operación del embalse

En lo que se refiere a la operación del embalse, y a falta de más información, se considerará que el nivel del NAMO (170 msnm) es el representativo del funcionamiento del embalse [CFE, 2003b].

Considerando que el nivel en el embalse es variable con el tiempo, y que los volúmenes medios mensuales de entrada y salida del almacenamiento son diferentes, es necesario utilizar un modelo numérico de flujo permanente. En las simulaciones con el modelo se tomará en cuenta cierta incertidumbre en algunos datos fundamentales como lo son las características del sedimento y el coeficiente de difusión, que son necesarios para una modelación más precisa.

Para tomar en cuenta que los gastos de entrada y salida del vaso cambian a lo largo del año y para cumplir con la hipótesis de flujo permanente, se tienen varias consideraciones como son: que el gasto que entra al vaso es igual al que sale por la obra de toma, y que el nivel y el volumen almacenado en el vaso se mantiene constante debido a que no hay cambio en el almacenamiento, de no suceder esto, la malla de cálculo tendría que adaptarse a los diferentes niveles de operación para cada iteración en el tiempo, lo que complicaría el empleo de este modelo. Tomando en cuenta las suposiciones anteriores se logrará tener la discretización del vaso, que se mantendrá constante durante la modelación y permitirá disminuir de manera considerable el tiempo de cálculo.

5. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO Y RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

De acuerdo con lo planteado en los capítulos anteriores, se integraron los diferentes programas de cálculo que se presentan en los apéndices E y F . Ahí se muestran los listados de los programas empleados, los cuales fueron desarrollados empleando la hoja de cálculo de Mathcad para la determinación de los anchos de cada sección transversal y programación en lenguaje C++, para la determinación de las velocidades y la evolución de la turbidez en el embalse.

Una primera parte del cálculo consiste en determinar los anchos de cada sección transversal; calculando los anchos promedio de cada celda de cálculo. Empleando los anchos promedio y los gastos mensuales, se calcula la hidrodinámica del embalse, para ello se determinan las áreas y velocidades en cada celda. Empleando los datos de velocidad de caída del material, y los coeficientes de difusión propuestos, así como las concentraciones de partida, se determinan las condiciones para iniciar la simulación. Finalmente,

resolviendo para cada celda las ecuaciones planteadas en el capítulo 4 se calcula la evolución de la turbidez en el embalse para cada intervalo de tiempo Δt durante todo el periodo requerido de simulación.

A grandes rasgos la integración de los programas se realiza de la manera siguiente:

1. A partir de las secciones transversales se determinan los anchos en elevaciones que fueran múltiplo de 5 m; esto permitió tener 30 celdas en la dirección vertical, desde el fondo hasta el NAMO en la zona más profunda. Con esta información se calculan los anchos medios de cada celda empleando el programa datos-venta-parota.mcd (apéndice E).
2. Se calculan las velocidades mensuales con el programa turbidez.cpp (apéndice F) de acuerdo con los gastos mostrados en la tabla 4.2.
3. Se simulan las concentraciones de sedimento en el embalse para cada mes de un año completo, de acuerdo con los datos de la tabla 4.4 y utilizando las velocidades calculadas en el punto anterior. La simulación de las concentraciones se realiza también con el programa turbidez.cpp.

5.1 Datos empleados en las simulaciones

Debido a que se desconocen las condiciones iniciales de concentración para realizar la simulación del año representativo, es necesario realizar una etapa preliminar para definir tales condiciones. En esta etapa se realiza una simulación donde las concentraciones iniciales son cero en todas las celdas, hasta después de varios años de simulación, cuando las concentraciones de salida no varían sensiblemente. Para este trabajo, se logró la estabilización con cinco años de simulación, con ello se considera que esas son las condiciones iniciales representativas y con ello se realiza la simulación del año característico.

Datos para las simulaciones:

Períodos de simulación preliminar: cinco años

Período de simulación final: un año (enero a diciembre)

Velocidades de caída: Las velocidades de caída van desde 0.00003 m/s (material “fácilmente sedimentable”), hasta 1×10^{-12} m/s (material que produce la turbidez)

Coefficientes de difusión: $0.0000001 \text{ m}^2/\text{s}$, $0.00001 \text{ m}^2/\text{s}$ y $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$

Intervalo de cálculo: $\Delta t = 1$ hora

Tamaño de las celdas: $\Delta x = 140$ a 3500 m , $\Delta y = 5 \text{ m}$

5.2 Resultados de las simulaciones

Se calculó la hidrodinámica del embalse para los gasto correspondientes a cada mes del año, la dirección de las velocidades se presenta en la figura 5.1, las velocidades mayores se presentaron durante el mes de septiembre; en la figura 5.2 se representa su magnitud. Las velocidades menores se presentaron en los meses de abril y mayo y en la figura 5.3 se muestra su magnitud.

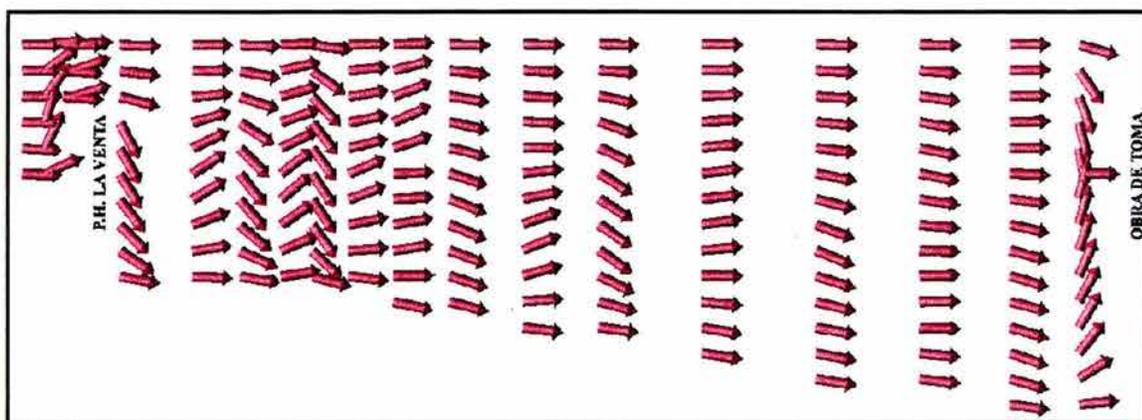


Figura 5.1 Campo de velocidades

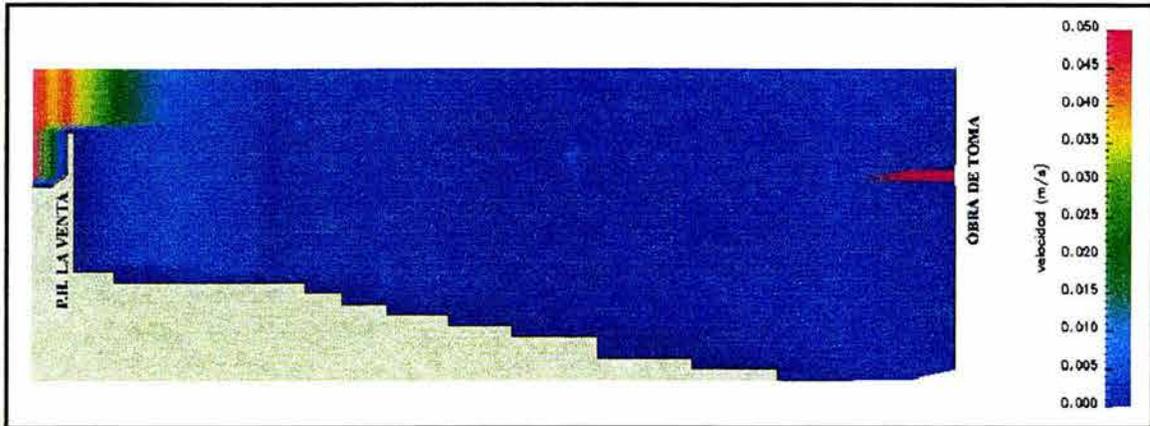


Figura 5.2 Magnitud de velocidades para el mes de septiembre

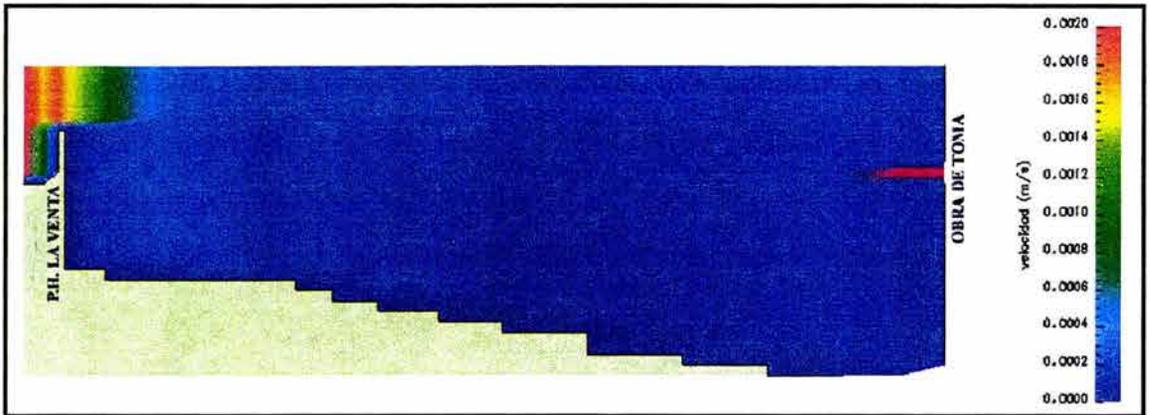


Figura 5.3 Magnitud de velocidades para los meses de abril y mayo

Se modelaron ocho tipos de materiales con las velocidades de caída siguientes:

- a) $\omega_1 = 0.000003 \text{ m/s}$
- b) $\omega_2 = 0.0000144 \text{ m/s}$
- c) $\omega_3 = 0.0000036 \text{ m/s}$
- d) $\omega_4 = 0.0000018 \text{ m/s}$
- e) $\omega_5 = 0.000001 \text{ m/s}$
- f) $\omega_6 = 0.0000005 \text{ m/s}$
- g) $\omega_7 = 0.000000052 \text{ m/s}$
- h) $\omega_8 = 0.00000000001 \text{ m/s}$

Para tener una idea de lo que representan las velocidades anteriores con relación al tamaño del material, se empleó la información presentada en Maza (1990), relativa a la determinación de la velocidad de caída en relación con el tamaño del material. En particular empleando la ecuación 2.11 de dicha referencia, aplicable a materiales con diámetros menores a 0.1 mm, se puede expresar:

$$\omega_0 = \frac{g\Delta D^2}{18\nu} \quad (5.1)$$

donde

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (5.2)$$

- ω_0 velocidad de caída en m/s
- g aceleración de la gravedad igual a 9.81 m/s^2
- Δ densidad relativa igual a 1.65
- ν viscosidad cinemática igual a $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- D diámetro de las partículas, en m

Sustituyendo y simplificando la ecuación anterior se obtiene:

$$\omega_0 = 900000D^2 \quad (5.3)$$

Cabe resaltar que la ecuación anterior no es confiable para materiales arcillosos, sin embargo, a falta de mayor información en detalle respecto al material fino que llegará al embalse, se ha considerado conveniente emplearla como referencia para interpretar los resultados. Si bien el tamaño de los materiales considerados en la ecuación 5.3 serán útiles cualitativamente, la validez de las velocidades de caída sí serán representativas del comportamiento del material, ya que ellas han sido propuestas dentro del intervalo de las velocidades de caída señaladas en los incisos anteriores.

Como referencia, se presenta parte de la tabla 2.1 de la misma referencia Maza (1990), donde se clasifican los materiales por su tamaño.

Tabla 5.1 Clasificación de sedimento según Maza (1990)

Material	Clase	Tamaño (mm)
LIMO	Fino	0.008 000-0.016 000
	Muy fino	0.004 000-0.008 000
ARCILLA	Gruesa	0.002 000-0.004 000
	Media	0.001 000-0.002 000
	Fina	0.000 500-0.001 000
	Muy fina	0.000 240-0.000 500

Empleando las velocidades de caída propuestas, la ecuación 5.3, y la clasificación de la tabla anterior, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 5.2 Velocidades de caída

Velocidad de caída (m/s)	Diámetro (mm)	Clasificación
0.00003	0.005770	Limo muy fino
0.0000144	0.004000	Arcilla gruesa (lim. sup)
0.0000036	0.002000	Arcilla gruesa (lim. inf)
0.0000018	0.001400	Arcilla media
0.000001	0.001054	Arcilla media
0.0000005	0.000745	Arcilla fina
0.000000052	0.000240	Arcilla muy fina
1.0×10^{-12}	0.000001054	Material disuelto

Para cada material se realizaron simulaciones empleando los tres coeficientes de difusión propuestos en el capítulo anterior, las concentraciones con que sale el agua por la obra de toma para cada uno de los coeficientes se muestran en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 . En el capítulo 6 se presentarán las conclusiones correspondientes.

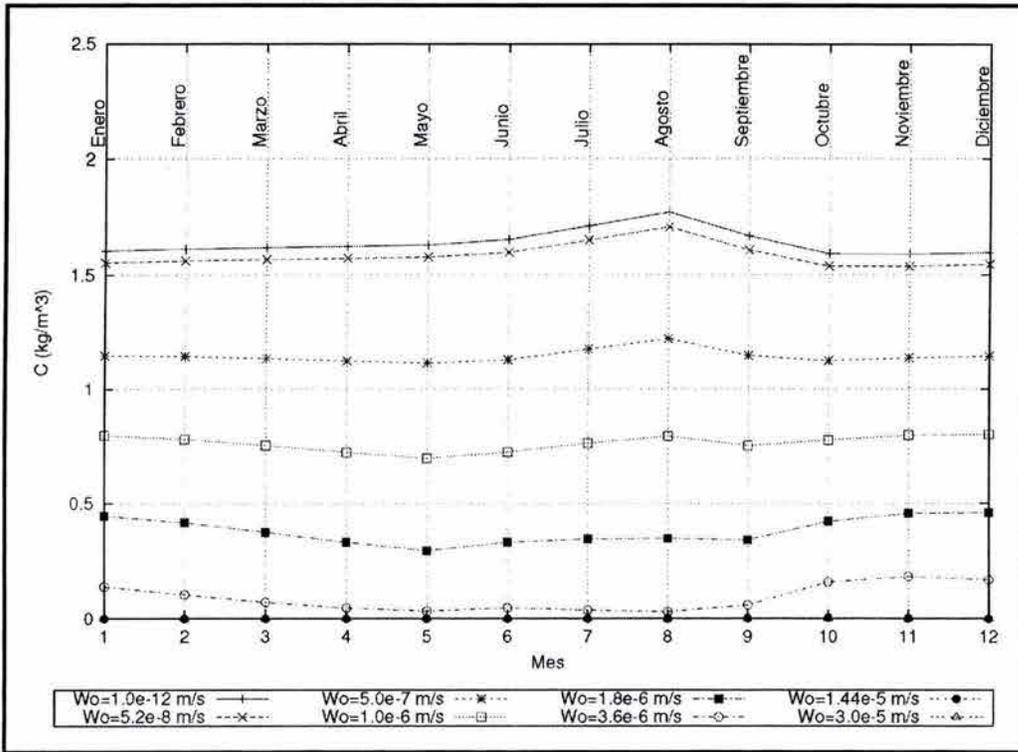


Figura 5.4 Concentraciones en la obra de toma para $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$

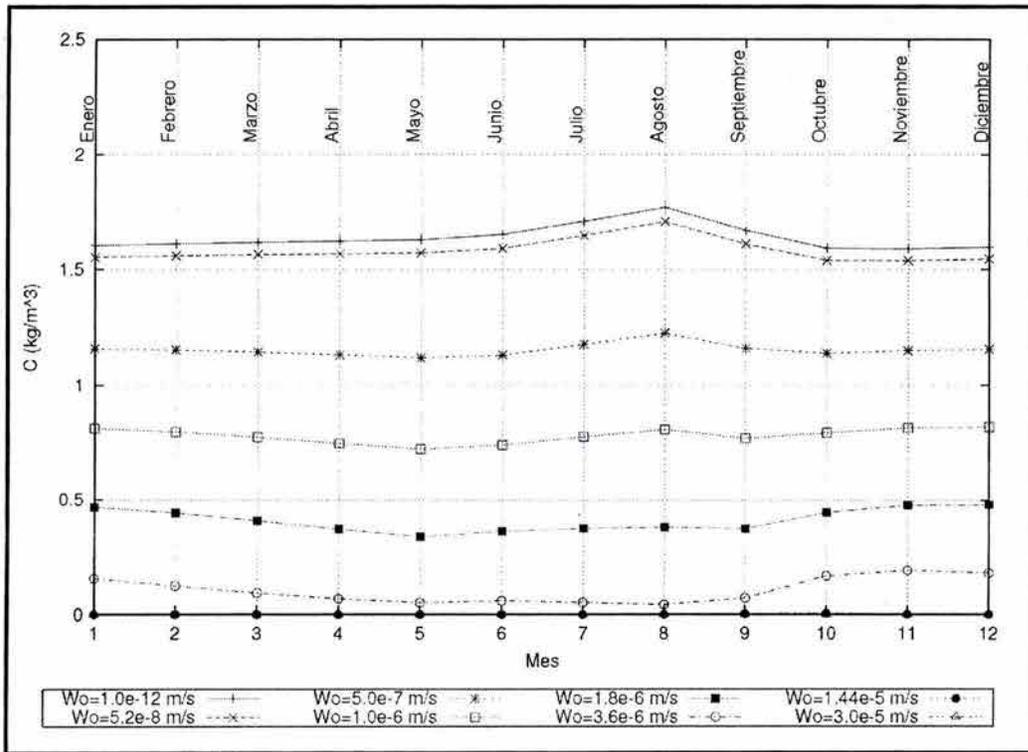


Figura 5.5 Concentraciones en la obra de toma para $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$

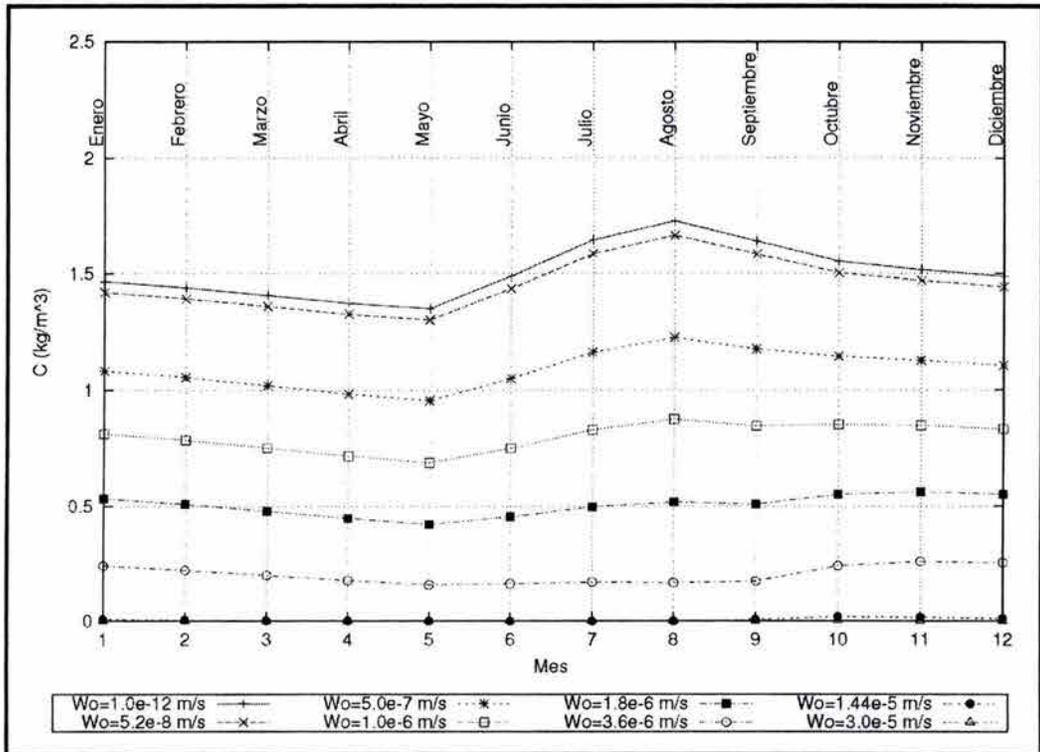


Figura 5.6 Concentraciones en la obra de toma para $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

Se calculó la distribución del sedimento en todo el embalse para los ocho diferentes tipos de material y los tres valores de coeficiente de difusión, esto para cada mes del año. Por lo anterior, se obtuvieron resultados de 288 meses simulados, debido a la gran cantidad de información que esto representa, sólo se muestra dentro de éste capítulo la distribución de sedimentos en todo el embalse para condiciones que se consideran representativas (mes de agosto para $\omega_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$). Dentro del apéndice C, se presenta con más detalle de ésta información.

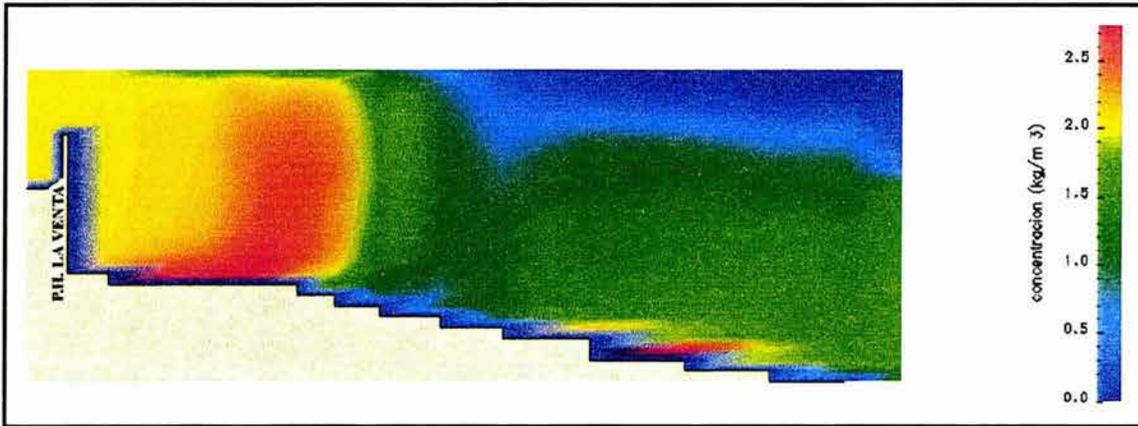


Figura 5.7 Distribución de la concentraciones de sedimentos en todo el embalse para el mes de agosto con $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ y $\omega_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

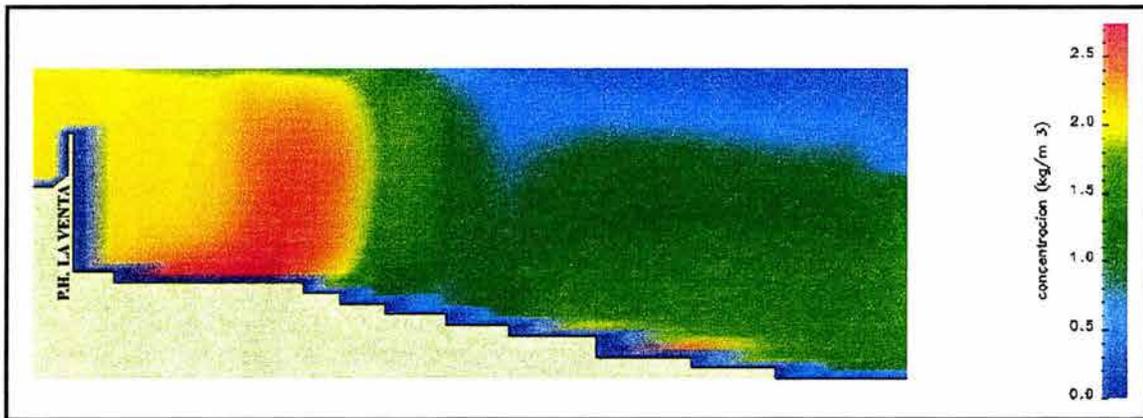


Figura 5.8 Distribución de la concentraciones de sedimentos en todo el embalse para el mes de agosto con $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ y $\omega_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

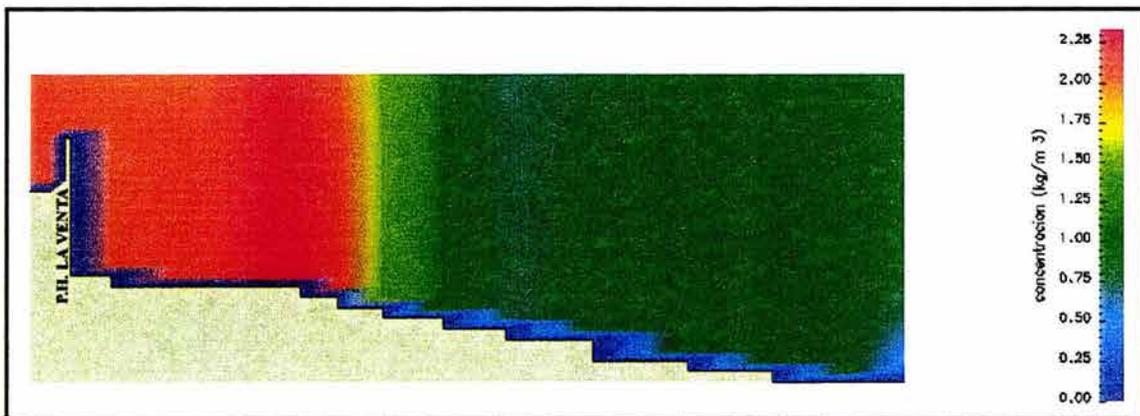


Figura 5.9 Distribución de la concentraciones de sedimentos en todo el embalse para el mes de agosto con $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$ y $\omega_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

La distribución vertical de la concentración en una sección intermedia del embalse (sección 4 de la figura B.1 del apéndice B), considerando una velocidad de caída $\omega_0 = 1 \times 10^{-6}$ m/s y los tres coeficientes de difusión, se presentan en las figuras 5.10, 5.11 y 5.12. Para otras secciones del embalse, los perfiles de concentración se presentan en el apéndice B.

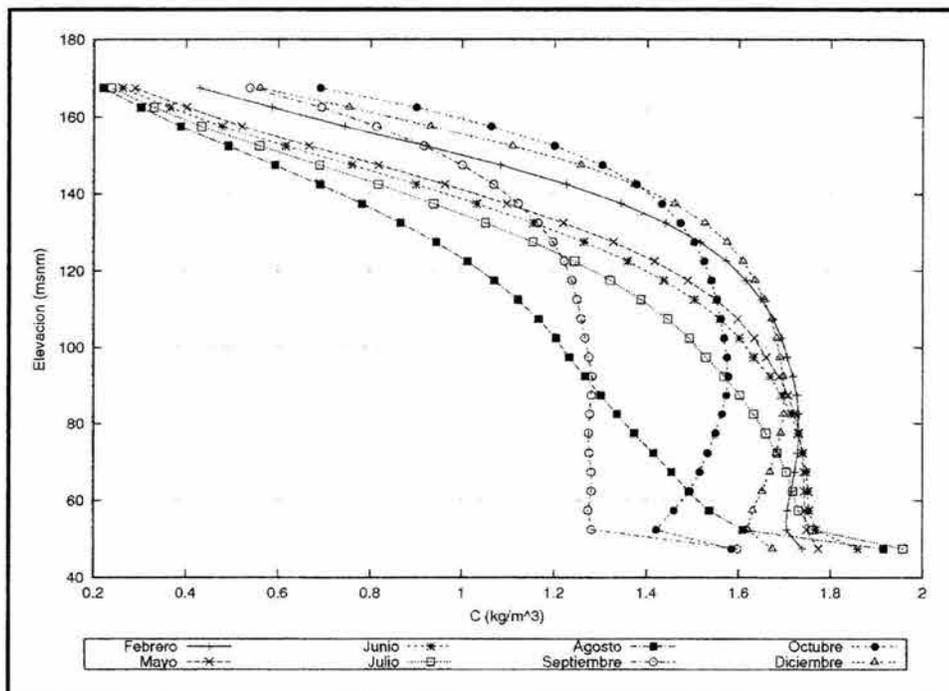


Figura 5.10 Perfil de concentraciones verticales en la sección 4 para $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3}$ cm²/s y $\omega_0 = 5 \times 10^{-7}$ m/s

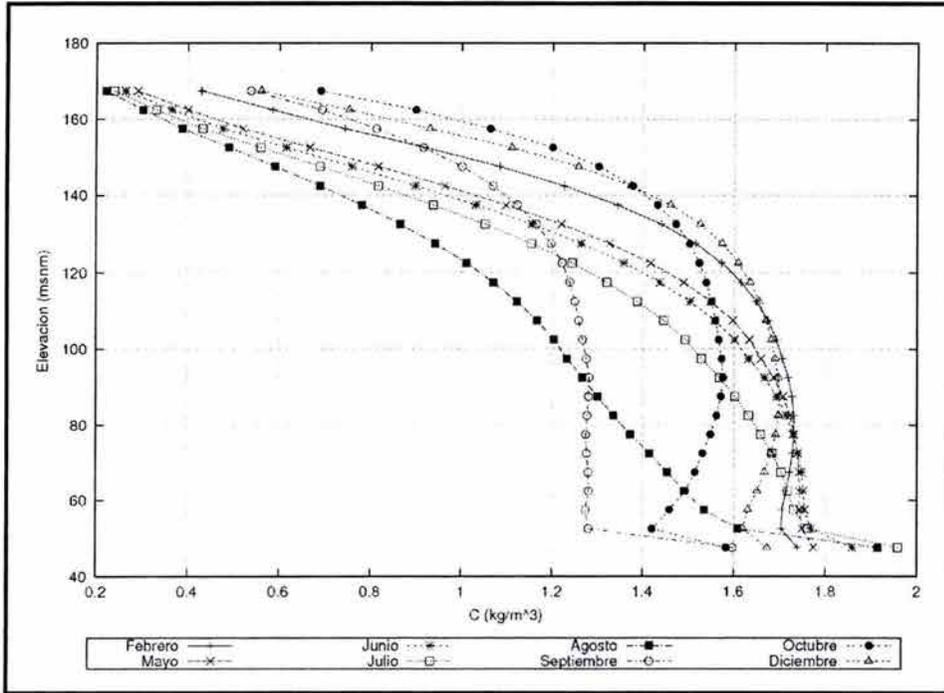


Figura 5.11 Perfil de concentraciones verticales en la sección 4 para $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$

y $\omega_0 = 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

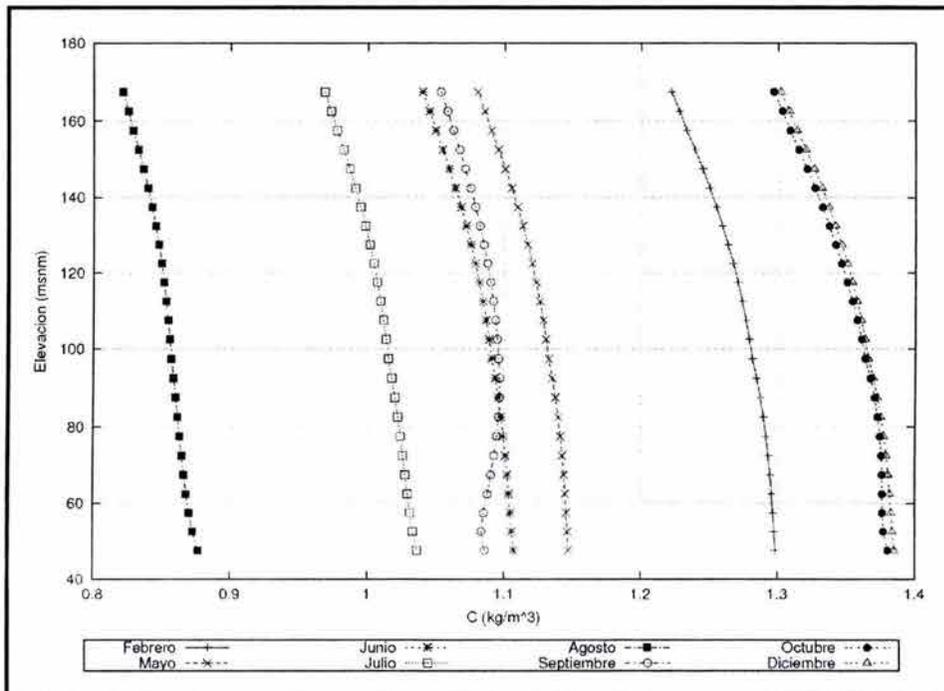


Figura 5.12 Perfil de concentraciones verticales en la sección 4 para $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$ y

$\omega_0 = 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

Por medio de la simulación, fue posible determinar el depósito anual de material fino dentro del embalse, para los ocho tipos de material y los coeficientes de difusión propuestos. Esto se puede apreciar en las figuras 5.13, 5.14 y 5.15. En el apéndice D, se presentan los resultados correspondientes a los cálculos realizados para los diferentes tipos de materiales utilizados.

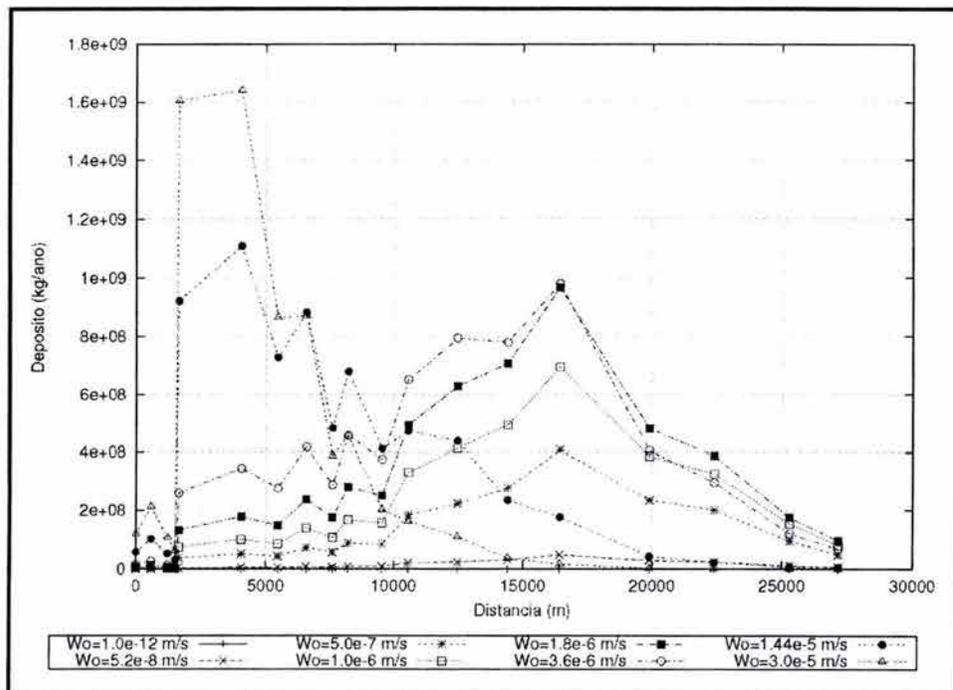


Figura 5.13 Depósito de material fino a lo largo del embalse desde la confluencia hasta la cortina del P.H. La Parota $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$

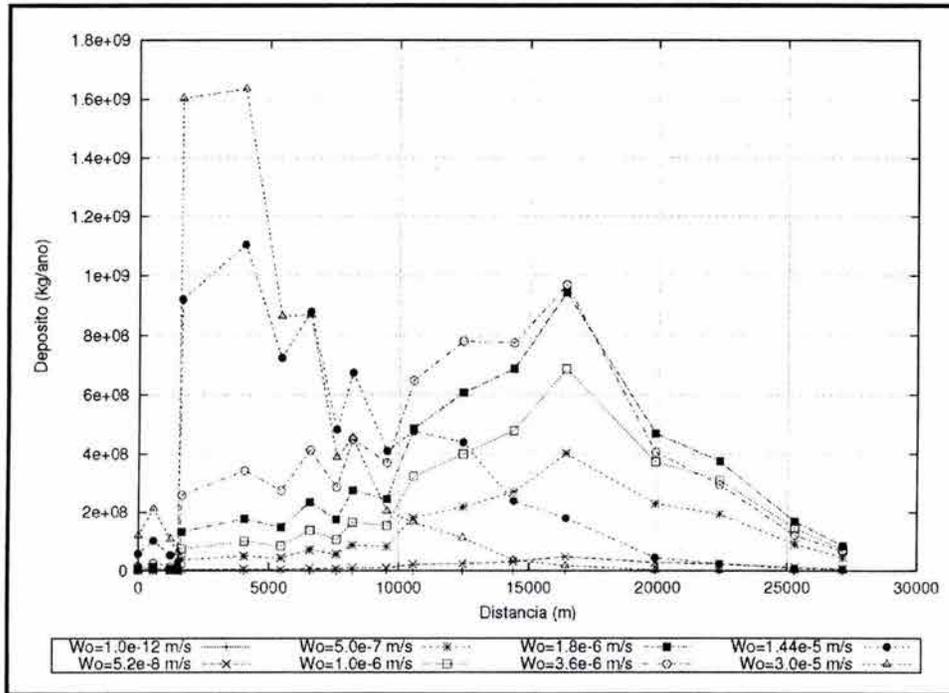


Figura 5.14 Depósito de material fino a lo largo del embalse desde la confluencia hasta la cortina del P.H. La Parota $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$

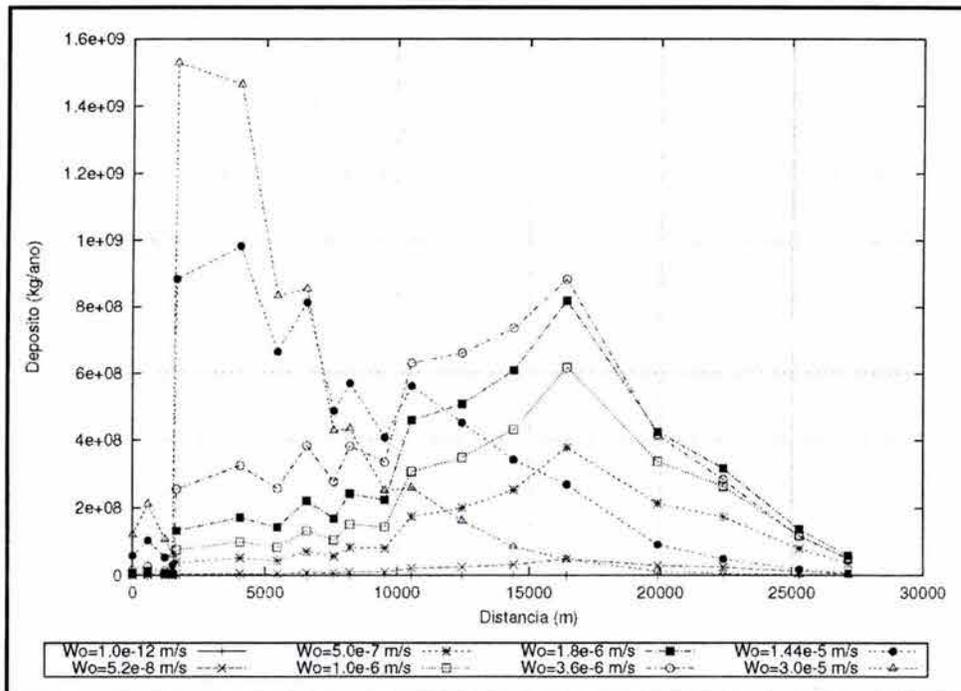


Figura 5.15 Depósito de material fino a lo largo del embalse desde la confluencia hasta la cortina del P.H. La Parota $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

El análisis del comportamiento del sedimento dentro del embalse, tiene como finalidad determinar las tasas de sedimentación, ubicar las principales zonas de depósito y definir la calidad del agua (turbidez) tanto dentro del embalse como a la salida por la obra de toma. Los resultados de este análisis servirán para definir y proponer las posibles medidas de mitigación dentro y fuera del embalse. En este trabajo se analiza solamente el comportamiento del material sólido inorgánico como origen de la turbidez.

Este trabajo se realiza empleando un modelo numérico de simulación, y se aplica para el embalse del P. H. La Parota. Los datos empleados son los promedios de gastos y concentraciones mensuales, obtenidos de registros históricos en el lugar. Se realiza una simulación de cinco años para obtener las condiciones iniciales y a partir de ahí se realiza la simulación de un año característico. Los resultados obtenidos son la evolución de las concentraciones en todo el vaso durante el año de simulación, las concentraciones de salida

por la obra de toma y las tasas y zonas de depósito dentro del embalse, lo anterior se realizó para ocho tipos de material y los coeficientes de difusión propuestos.

Se propusieron tres coeficientes de difusión para analizar su efecto en el comportamiento del sedimento suspendido que da origen a la turbidez.

6.1 Influencia del coeficiente de difusión en los resultados

La concentración de salida por la obra de toma es prácticamente la misma con los coeficientes α_1 y α_2 , sin embargo con el coeficiente α_3 se presenta una pequeña variación que se puede apreciar en la tabla 6.1 donde se presentan las concentraciones correspondientes al mes de agosto.

Tabla 6.1 Comparación de concentraciones en la obra de toma correspondientes al mes de agosto

ω_0	Concentración		
	α_1	α_2	α_3
ω_1	1.773	1.768	1.725
ω_2	1.708	1.705	1.664
ω_3	1.221	1.224	1.223
ω_4	0.793	0.810	0.876
ω_5	0.349	0.379	0.519
ω_6	0.029	0.043	0.116
ω_7	0.000	0.000	0.000
ω_8	0.000	0.000	0.000

En lo que se refiere a la distribución del material suspendido dentro del embalse, considerando un material intermedio ($\omega_0 = 1 \times 10^{-6}$ m/s), en las figuras 5.7 y 5.8 se observa que la distribución es prácticamente la misma para α_1 y α_2 ; sin embargo, en el caso de α_3 (figura 5.9) se aprecia que el proceso de difusión dispersa la turbidez a lo largo de la dirección vertical.

El depósito del material fino a lo largo del embalse no se ve influenciado por el coeficiente de difusión ya que para los tres valores propuestos α_1 , α_2 y α_3 la ubicación del depósito y

su magnitud es prácticamente la misma como se puede apreciar en las figuras 5.13, 5.14 y 5.15.

6.2 Tasas de sedimentación anual en el embalse

En la tabla 6.2 se muestra la cantidad de material sedimentado para los diferentes tipos de material, como se mencionó en la subsección 6.1, el material depositado es muy similar para los tres coeficientes de difusión propuestos.

Tabla 6.2 Tasa de depósito anual de material fino dentro del embalse

ω_0	Depósito (kg)		
	α_1	α_2	α_3
ω_1	4.67E+03	4.65E+03	4.62E+03
ω_2	2.41E+08	2.39E+08	2.36E+08
ω_3	2.11E+09	2.07E+09	1.93E+09
ω_4	3.72E+09	3.63E+09	3.28E+09
ω_5	5.37E+09	5.24E+09	4.66E+09
ω_6	6.57E+09	6.52E+09	6.05E+09
ω_7	6.86E+09	6.85E+09	6.84E+09
ω_8	6.86E+09	6.86E+09	6.86E+09

La consideración más desfavorable que se podría presentar es que todo el material de lavado se deposite; de la información disponible se tiene que el peso específico de dicho material es $\gamma = 1120 \text{ kg/m}^3$, por lo tanto el volumen del material depositado con estas condiciones es $6.24 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, lo que representa el 0.1% del volumen total del embalse. Haciendo una estimación para 50 años el sedimento depositado reduciría sólo en 5% la capacidad del embalse.

El material de mayor tamaño se deposita principalmente en una zona que abarca aproximadamente 10 km después de la cortina del P. H. La Venta. Para material más fino, el depósito ocurre en una zona que va de los 10 a los 25 km aguas abajo de La Venta, o sea en la parte media del almacenamiento (figuras 5.13, 5.14 y 5.15)

6.3 La turbidez y la calidad del agua

Resultados para el material fácilmente sedimentable ($\omega_0 = 0.00003 \text{ m/s}$)

- a) La cantidad de sedimento que entra al embalse en un año es de $6.24 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- b) Prácticamente se deposita todo el material entrante.
- c) La retención del embalse (para este tipo de material) es del 100 %
- d) Concentraciones de entrada al embalse y salida por la obra de toma

	Entrada Kg/m ³	Salida Kg/m ³	Salida/Entrada porcentaje
Máxima	3.2	0.00	0.00

- e) El sedimento que entra al embalse no alcanza a salir por la obra de toma debido a que su velocidad de caída es tan grande que todo el material se deposita.

Comportamiento del material no sedimentable ($\omega_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$)

Los principales resultados son los siguientes:

- a) Concentraciones de entrada al embalse y salida por la obra de toma

	Entrada Kg/m ³	Salida Kg/m ³	Salida/Entrada
Máxima	3.2	1.773	55.4%

Lo anterior significa que el embalse reduce la concentración máxima en 44.6% ($100\% - 55.4\% = 44.6\%$).

- b) El tiempo promedio que tarda el sedimento (no sedimentable) desde que entra al embalse hasta que sale por la obra de toma es de 18 meses, esto se determinó a partir del campo de velocidades calculado dentro del embalse, simulando el desplazamiento de una partícula por medio de la ecuación $ds = vdt$, donde s es el desplazamiento y v las velocidades calculadas.

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

Las concentraciones dentro del vaso varían mucho de sección a sección, sin embargo en la zona de entrada hasta antes de la cortina del actual P. H. La Venta, la concentración tiende a ser constante en las verticales.

Una vez que el embalse del P.H. La Parota esté en operación, será necesario medir en campo, la validez de las hipótesis realizadas y el valor de los parámetros empleados; en especial las características del material en suspensión, el coeficiente de difusión y el funcionamiento de la obra de toma.

También es necesario revisar el aspecto de calidad del agua desde el punto de vista del cambio químico-biológico, ya que ello podrá alterar las características del material en suspensión, en especial su velocidad de caída.

Una vez que el embalse esté en funcionamiento, será necesario llevar a cabo una medición sistemática de los parámetros que generan la turbidez, para ello existen procedimientos de campo bien desarrollados (URS, 2001) que permiten caracterizar adecuadamente el problema, además de que los límites aceptables de turbidez, dependerán del uso del agua.

En el trabajo de Miller, 2002, se proponen algunos valores de la turbidez para diferentes aplicaciones. Tratando de fijar ideas generales, se puede considerar que por ejemplo, para agua potable, la turbidez máxima recomendada es de 0.5 NTU's y para los peces se recomienda no superar los 100 NTU's. Recordando lo mencionado en el capítulo 2, podría considerarse (en términos muy generales) que aproximadamente $1 \text{ NTU} = 0.001 \text{ gr/lit} = 0.001 \text{ kg/m}^3$, entonces se podrá concluir de las simulaciones realizadas que las concentraciones en la parte media del embalse oscilarán entre 0.5 y 3 kg/m^3 (500 y 3000 NTU's), con valores mínimos de 0.003 kg/m^3 (3 NTU's) por lo cual se puede concluir que los valores exceden substancialmente cualquiera de los valores antes mencionados para el agua potable y los peces. Lo anterior sería el caso de turbidez más desfavorable, que corresponde a la sedimentación mínima, sin embargo cuando esta es máxima entonces los valores de turbidez decrecen substancialmente al aproximarse a la cortina a un máximo de 0.0017 kg/m^3 (1.7 NTU's), con valores mínimos de 0.0002 kg/m^3 (0.2 NTU's). Si bien estos valores no cumplen con los límites de agua potable, los valores son suficientemente bajos para permitir la vida de los peces. Esto no representa ningún problema mayor, ya que

cuando se trata de emplear cualquier fuente superficial para tomar agua potable, siempre es necesario aplicar un tratamiento donde la primera fase es la eliminación de las partículas sólidas y los rangos de turbidez calculados para el embalse no representan ningún caso extraordinario. Si la toma se ubica aguas abajo de la cortina, entonces el problema será menor, ya que como antes se mencionó, el embalse disminuye la turbidez del agua a la salida por la obra de toma.

6.4 Variación del volumen de sedimentos dentro del embalse a lo largo del tiempo

Es muy importante hacer notar que dada la gran capacidad de almacenaje del embalse, se puede considerar como no grave el problema de pérdida de capacidad, debido al posible depósito del material fino. Sin embargo, el aporte de sedimento es muy grande y se refleja en las altas concentraciones de entrada, lo cual muestra el grave problema de erosión en las cuencas de aporte. De hecho, sería mejor considerar que el problema de turbidez es el reflejo del impacto del medio ambiente, ocasionado por la erosión, sobre el P. H. La Parota y no al revés, como puede explicarse con el proceso de deforestación, donde el suelo queda descubierto y es arrastrado hasta el embalse. Lo anterior se refleja en la paradoja de que el suelo útil que se pierde en las cuencas, se convierte en el sedimento inútil que azolva los embalses.

Una aclaración importante en cuanto al fenómeno de sedimentación en general es la siguiente: en este trabajo no se ha considerado la parte del sedimento grueso, ya que este no interviene en el fenómeno de turbidez. El sedimento grueso tendrá un comportamiento muy diferente, y seguramente, dadas las velocidades calculadas en el vaso, este depósito ocurrirá sólo en las entradas al embalse. Seguramente el depósito de este material causará el aumento de las curvas de remanso hacia aguas arriba del embalse, este fenómeno se agravará paulatinamente conforme pase el tiempo al aumentar el depósito. Para determinar el comportamiento del sedimento grueso, es necesario emplear un modelo numérico para simular el comportamiento de este tipo de sedimento. Esto además de contar con la información hidrológica de las avenidas esperadas durante la vida útil del embalse y el aporte de sedimento grueso al vaso. La presencia de la cortina del P. H. La Venta en el

vaso de La Parota, seguramente hará que el material grueso quede confinado entre ese sitio y las entradas del embalse.

6.5 Escenarios corto, mediano y largo plazo

Corto plazo (0 a 5 años)

En este escenario ocurrirá una etapa de adaptación, donde las simulaciones realizadas sólo son una aproximación. En esta etapa lo único que es razonable hacer en cuanto al problema de turbidez, es el realizar mediciones del material en suspensión que penetra al embalse, de la evolución de la turbidez en distintos puntos de muestro en su interior y de la evolución del material sólido que sale del embalse por la obra de toma. Esto permitirá evaluar la magnitud de la problemática a esperar. Recuérdese que en este período ocurrirá la degradación de gran parte de la vegetación que actualmente se encuentra sobre la superficie del terreno, por lo cual la calidad del agua variará enormemente. En este escenario es conveniente recomendar que los monitoreos de turbidez se extiendan al tramo de aguas abajo del embalse, es decir al tramo entre la presa y la descarga al mar.

Probablemente la recomendación más importante para este período, es instrumentar la medición de sedimento (grueso y fino) en las entradas del embalse, ya que los datos empleados, en cuanto a los volúmenes de estos materiales, se obtuvieron de registros y cálculos de la literatura disponible, pero deben ser comprobados con mediciones sistemáticas.

Mediano plazo (5 a 15 años)

Muy probablemente en esta etapa el embalse esté alcanzando un comportamiento tal que las simulaciones realizadas representen bien su funcionamiento, por lo cual todas las conclusiones realizadas en este capítulo son aplicables. Durante este periodo será necesario hacer los mismos muestreos indicados en el inciso anterior, pero ahora esta información servirá para revisar la calidad de los resultados empleados en este trabajo, ya que es de esperar que la evolución de la turbidez sea similar a la calculada en este trabajo. Por supuesto, de realizarse las medidas de mitigación que se recomendarán adelante, ellas incidirán en el comportamiento del material sólido que constituye a la turbidez, sin embargo siendo realistas, probablemente en este plazo será prematuro tratar de observar

cambios apreciables. En otras palabras en este escenario es de esperar un comportamiento similar al calculado en este trabajo.

Largo plazo (hasta 50 años)

A largo plazo el comportamiento del embalse, desde el punto de vista de la turbidez, dependerá de las medidas adoptadas para el control del sedimento fino entrante el cual puede variar sensiblemente. A pesar de lo anterior se considera que los resultados obtenidos son aplicables a esta etapa. En la medida en que se controle el aporte de sedimento de las cuencas, serán los cambios en el grado de turbidez del embalse, pues el sedimento de entrega es el factor predominante. Respecto al incremento de la turbidez por la materia orgánica, esto dependerá de la evolución de dicho material dentro del embalse. En este caso, la medición directa en el vaso, es el procedimiento más recomendable para determinar la evolución de la turbidez. Hay que recordar que el aporte de sedimento no es la única medida de control en las cuencas, también el control de la calidad del agua condicionará el comportamiento del sedimento dentro del embalse.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los objetivos planteados al inicio del trabajo consistieron en determinar el comportamiento de la turbidez, la ubicación de las zonas de depósito del material y su cuantificación.

Para la turbidez, se propusieron tres coeficientes alfa, debido a que no se conocía con certeza el valor apropiado para el embalse. Los valores propuestos se encuentran dentro del umbral para difusión vertical mencionados en la referencia [Chapra, 1985].

Para las simulaciones realizadas se obtuvo que la concentración en la obra de toma es prácticamente la misma, como se observa en la tabla 6.1. La distribución de la turbidez dentro del embalse fue similar para los coeficientes $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ y $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ como puede verse en las figuras 5.7 y 5.8 sin embargo para el coeficiente $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$, la distribución de la turbidez en la dirección vertical resultó más uniforme debido a que el proceso de difusión vertical produjo un mayor transporte de sedimentos.

En lo que se refiere al depósito del material, se tiene que la distribución del material depositado y su magnitud fue prácticamente la misma para los tres coeficientes de difusión como se aprecia en las figuras 5.13, 5.14 y 5.15. En este caso el factor más importante fue la velocidad de caída del material, para la velocidad de caída más grande, el material se depositó en los primeros 10 km del embalse, y para los materiales con menor velocidad de caída, el depósito ocurrió entre los 10 y 25 km.

Las recomendaciones más importantes son las siguientes:

a) Si bien el problema de turbidez no genera un impacto importante en las tasas de sedimentación, sí puede implicar problemas en la calidad del agua. La recomendación más importante en este sentido, es la necesidad de detener el sedimento en las cuencas de aporte. Esta recomendación no depende de la construcción de la cortina del P. H. La Parota, es decir, aunque no se construyera la obra es necesario detener la erosión en la cuenca.

b) En el proceso típico de reforestación, será necesario definir la implementación de otras obras para el control del sedimento fino tales como: la construcción de terrazas, vías y fajas vegetadas, cultivos en contorno, etc. A este respecto existe una gran cantidad de literatura y procedimientos para el control de la erosión, dentro de los que se destacan el uso de la vegetación regional para implementar algunas de las obras de protección. El problema que se enfrentará en la práctica será la determinación de las prioridades en la atención a estos problemas, ya que normalmente la disponibilidad de recursos es escasa y el problema es muy grande. Con la determinación de las zonas con mayor aporte de sedimento (grueso y fino), será posible diseñar las obras a realizar y después de una evaluación técnico - económica, hacer una programación de las obras y actividades para atender aquellos casos donde, por el gran aporte de sedimentos, requieran una atención prioritaria.

c) Paralelo a los trabajos del control de la erosión, es necesario el saneamiento total de las cuencas de aporte para controlar, en lo posible, el aporte de nutrientes, pesticidas y en general todos aquellos productos que alteren la calidad del agua embalsada.

d) Para el cálculo del sedimento grueso de aporte y su control será necesario realizar la construcción de represas de sedimentación (*check dam*), la rectificación y protección de

cauces, el control de cárcavas, etc., además hay que considerar que el sedimento grueso quedará retenido antes de la cortina del actual P. H. La Venta, y por lo mismo su remoción tendrá que analizarse cuidadosamente, ya que dicha cortina condicionará el movimiento del sedimento grueso. Esto es, normalmente un procedimiento a emplear en la remoción del material sedimentado en un embalse es el dragado hidráulico, que consiste en vaciar el vaso y luego con los gastos de estiaje propiciar la erosión retrogresiva para arrastrar el material fuera del embalse (White, 2001). Evidentemente esto requeriría una descarga de fondo en la cortina del P. H. La Parota, la cual por ahora no está contemplada en el proyecto. Sin embargo lo que sí queda de manifiesto es la necesidad de remover, en el futuro, el sedimento grueso en las entradas al embalse.

Se recomienda realizar estudios para determinar el comportamiento del sedimento grueso, que permita establecer las acciones más viables para disminuir dicho aporte, cuantificar el depósito, determinar su ubicación y analizar su posible remoción. Para ello será necesario disponer de la información sobre los escurrimientos (avenidas) esperados en la vida útil del embalse, el aporte de sedimento grueso y la política de operación de la obra de excedencias.

REFERENCIAS

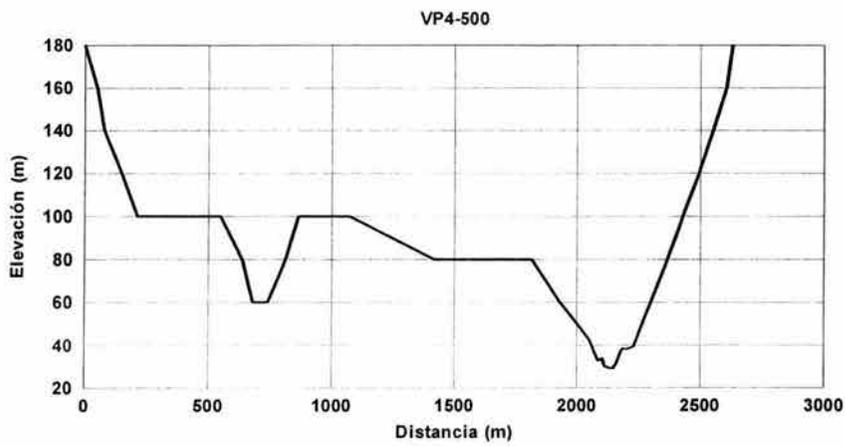
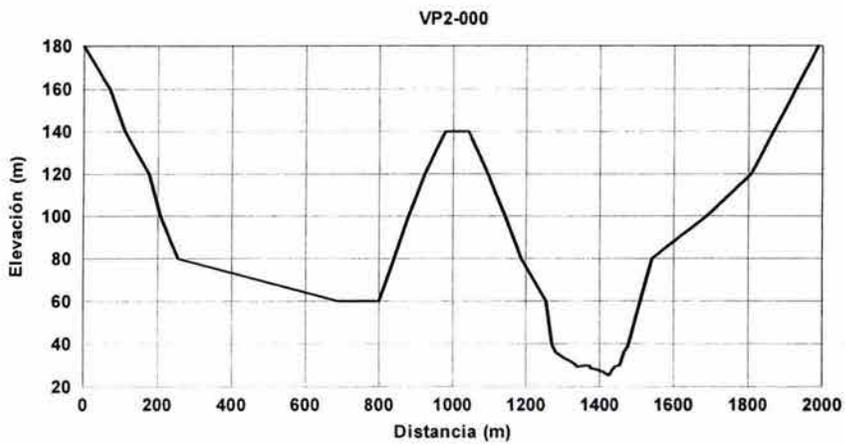
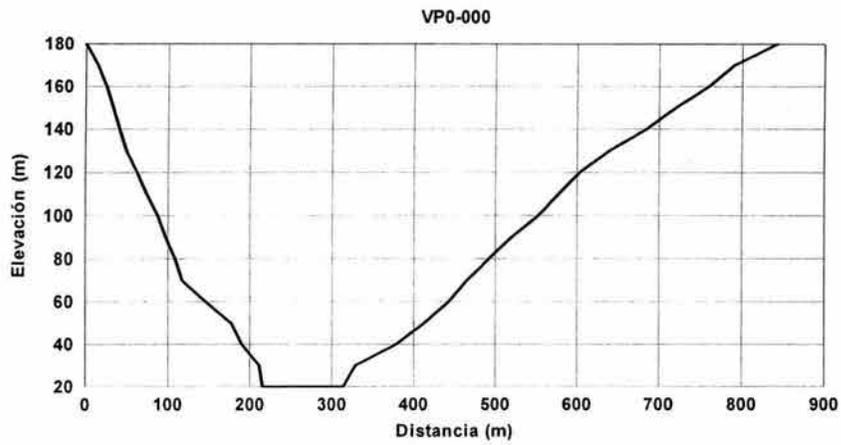
- CFE, 2003a, “P. H. La Parota, Gro., Estudio Hidrológico (Revisión 1)”, Subdirección de construcción, CFE
- CFE, 2003b, “Proyecto La Parota”, Coordinación de proyectos hidroeléctricos, CFE
- Gracia S J et al, 1992, “Estudio del comportamiento del material en suspensión dentro del embalse del P. H. Zimapán”, Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la CFE
- Gracia S J et al, 1992, “Estudio de turbidez en el embalse del P. H. Aguamilpa”, Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la CFE
- ICOLD, 1989, “Sedimentation control of reservoirs”, Comisión Internationale des Grands Barajes

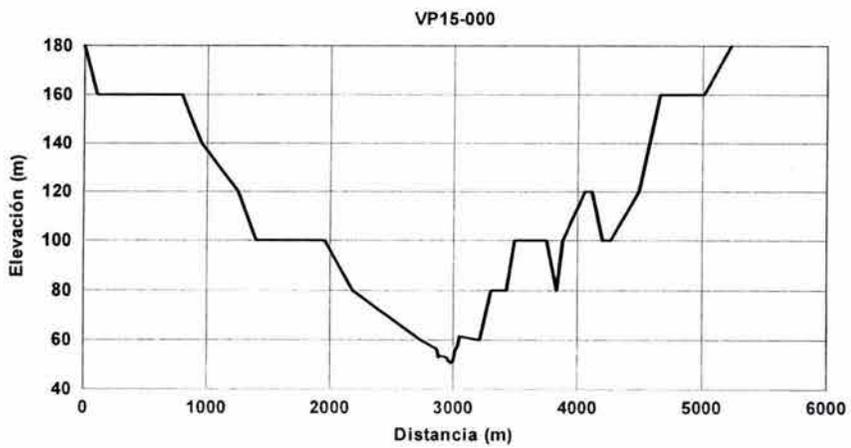
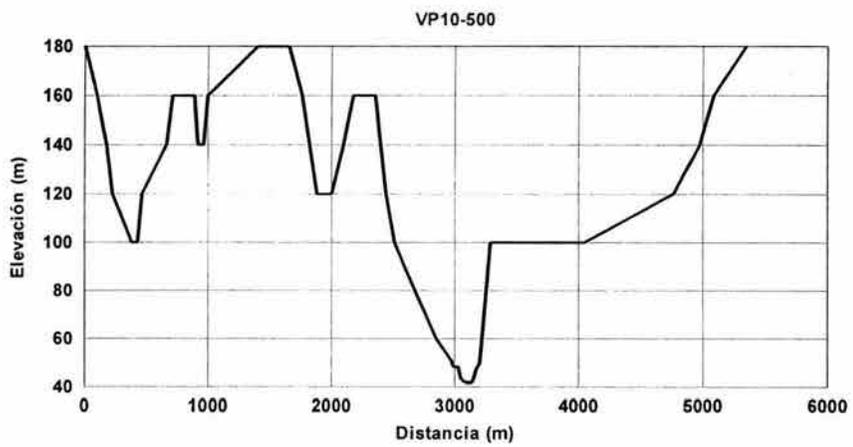
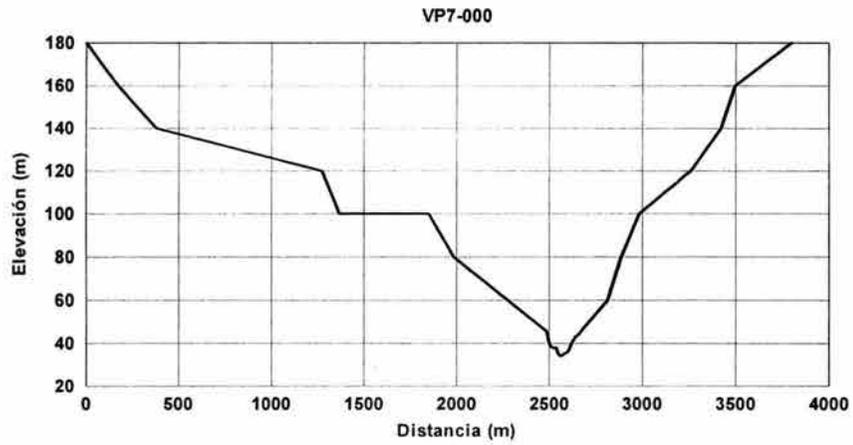
- Kikkawa H., 1978, “Reservoir sedimentation”, Chap.8, Proceedings of the first Semminary Japanase – American in erosion and sedimentation, Honolulu, Hawaii, USA
- Maza A J A, 1990, “Introduction to River Engineering”, Universitá Italiana per Stranieri, Italia.
- Mora Ch J M, Hernández B G, Uribe R R, 2002, “Proyecto Ejecutivo del Posible Efecto del P. H. La Parota sobre la Línea Costera de la Zona de la Desembocadura del Río Papagayo”, CFE
- Naoumura T & Aki S, 1976, “Long term persistence of turbid water phenomenon in Hitotsue Reservoir”, Douzième Congrés des Grands Barrages (Q.47,R.7)
- Olsen N, 1997, “Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering”, Class notes Division of Hydraulic and Environmental Engineering. The Norwegian University of Science and Technology
- PUMA, 2003, <http://132.248.14.26/laparota>
- PUMA, 2004, Manifestación de impacto ambiental modalidad regional del proyecto hidroeléctrico “La Parota”, Guerrero, UNAM, Coordinación de la investigación científica, PUMA.
- Streeter V, Wylie E, Bedford K, 2000, “Mecánica de Fluidos”, Mc Graw Hill, Capítulo 9 pág. 378, Colombia

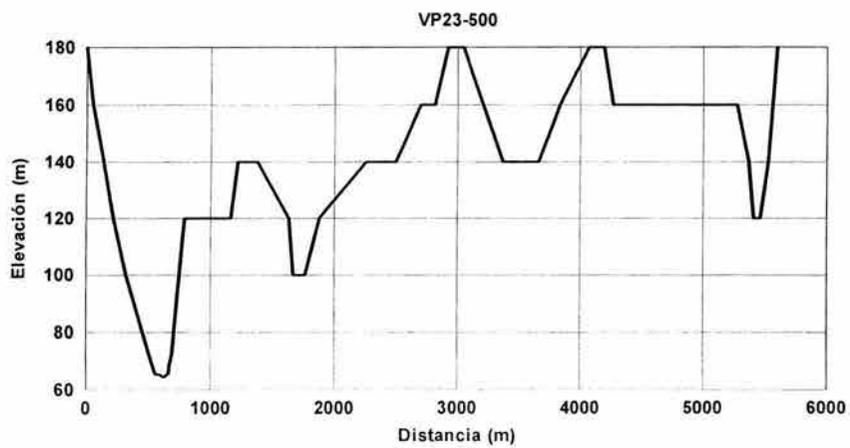
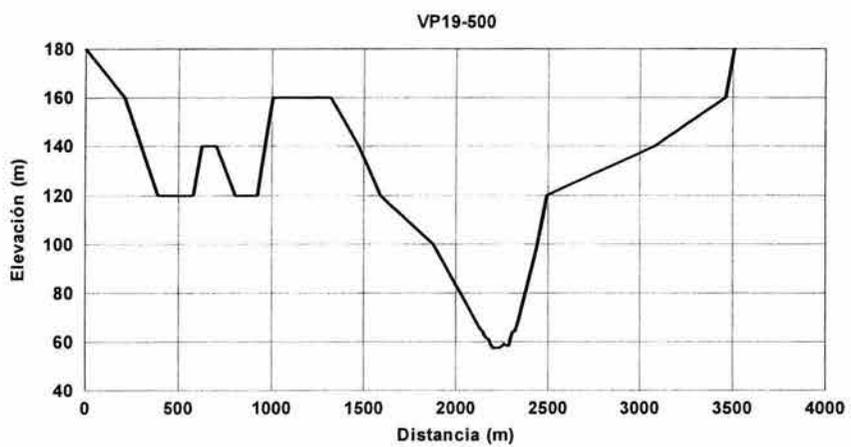
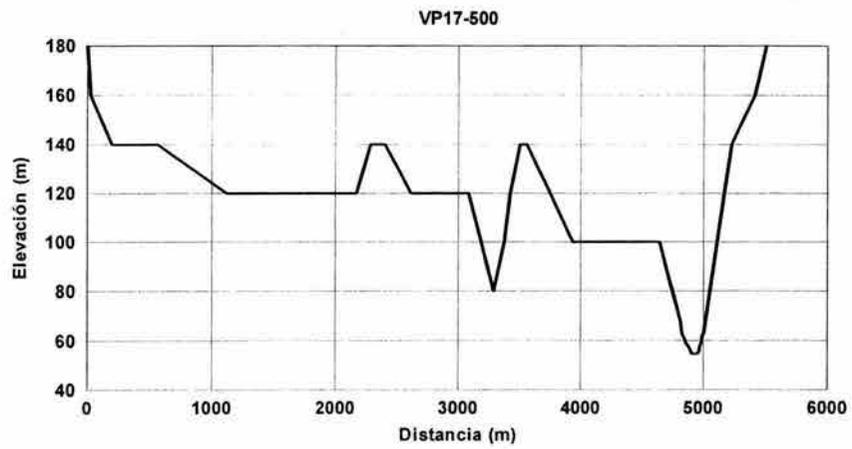
APÉNDICE A

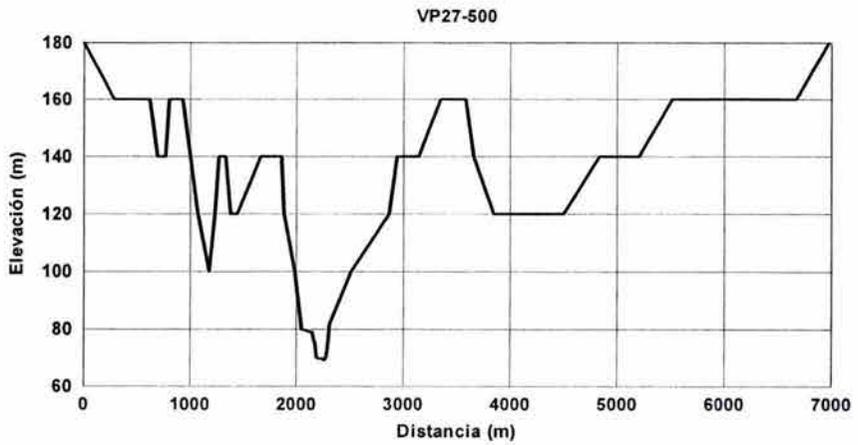
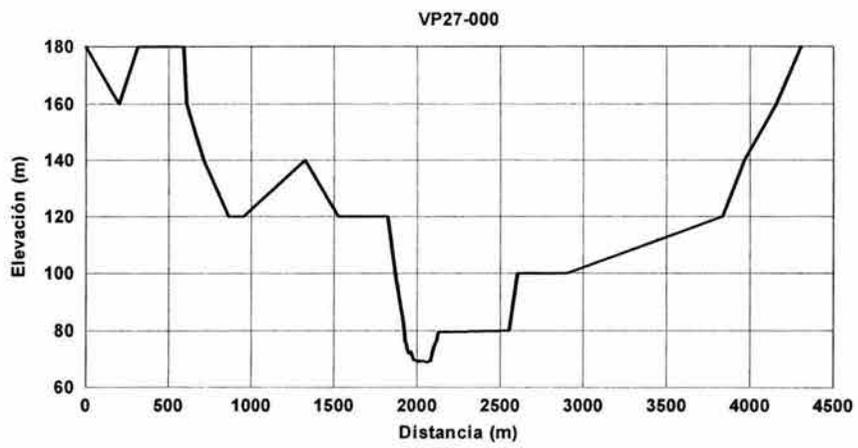
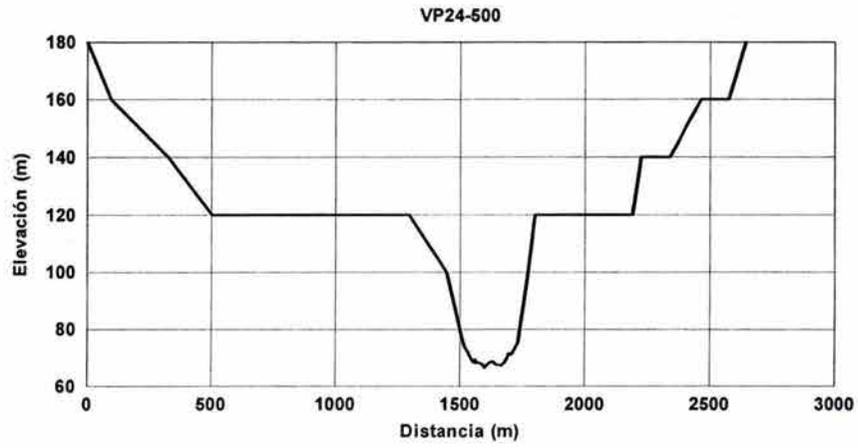
Secciones transversales desde la confluencia de los ríos Omitlán y Papagayo hasta la cortina del P. H. La Parota

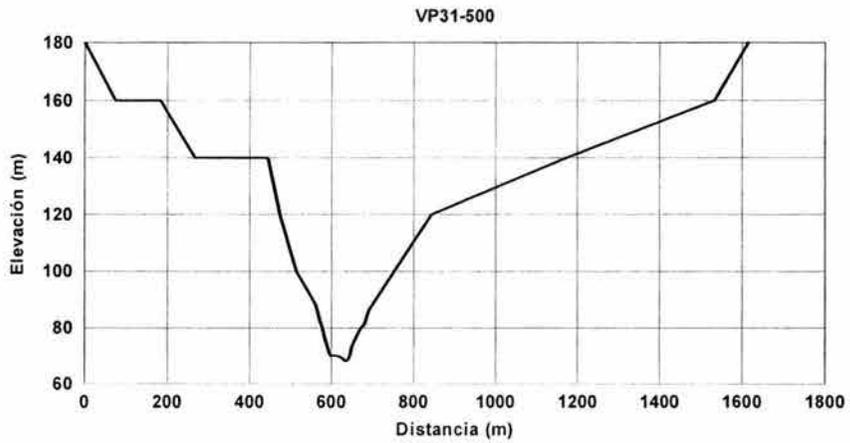
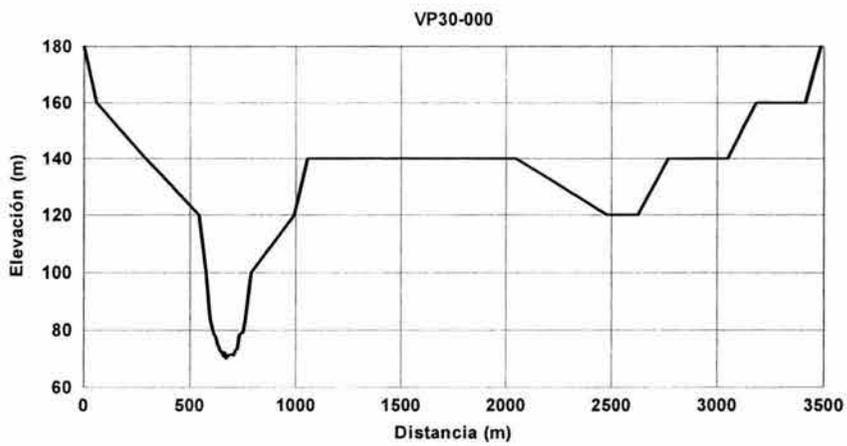
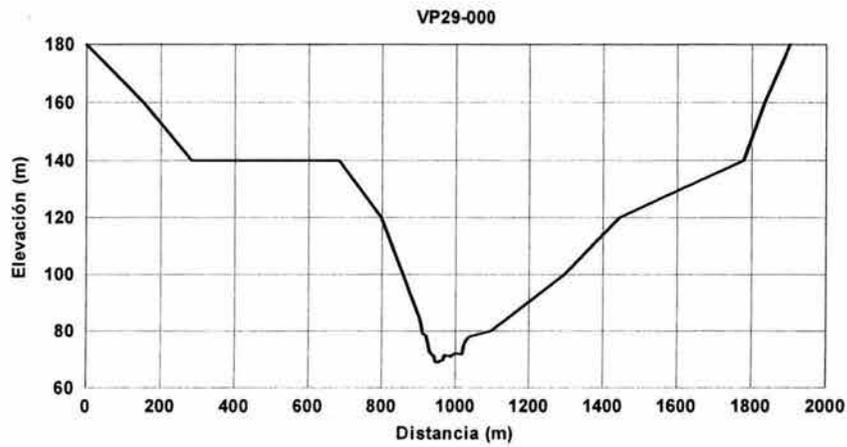
Secciones desde la confluencia de los ríos Omitlán y Papagayo hasta La Parota

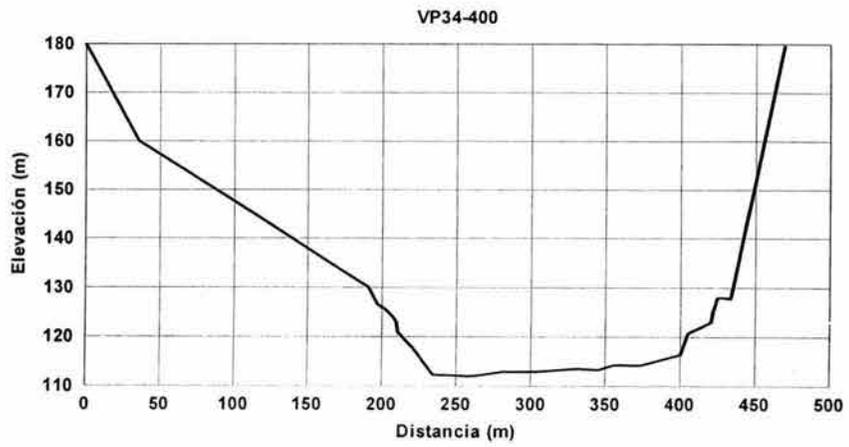
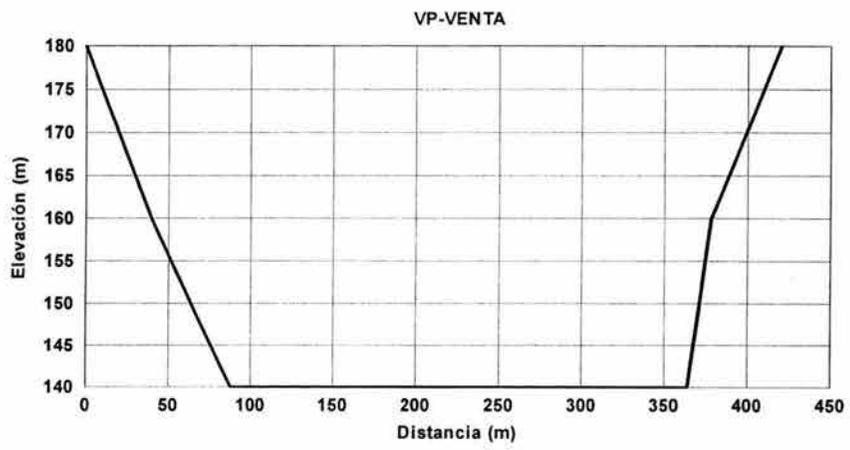
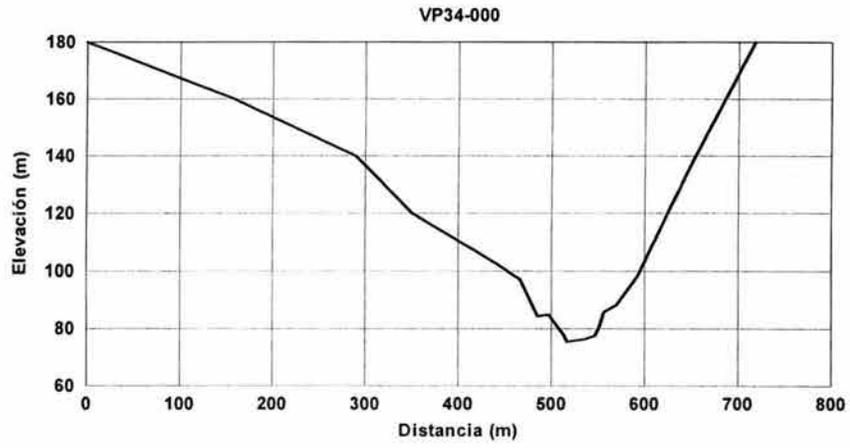


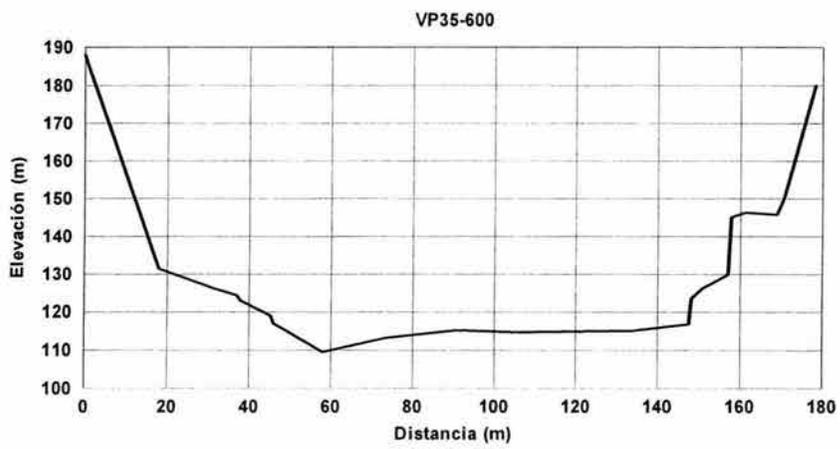
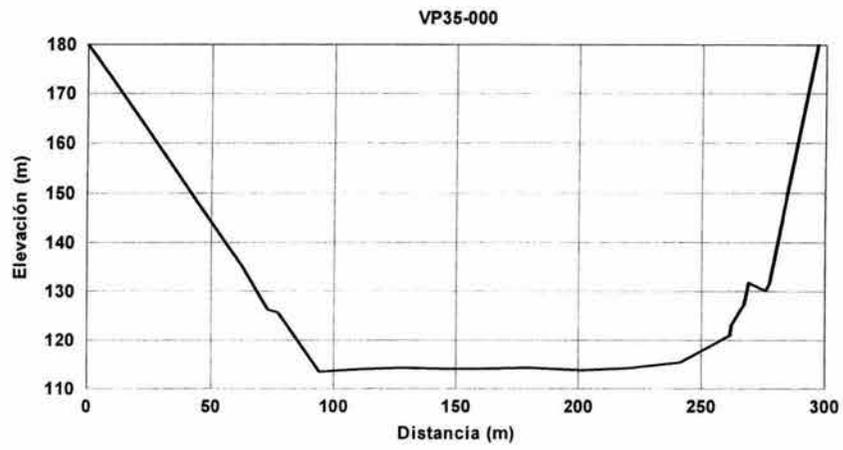




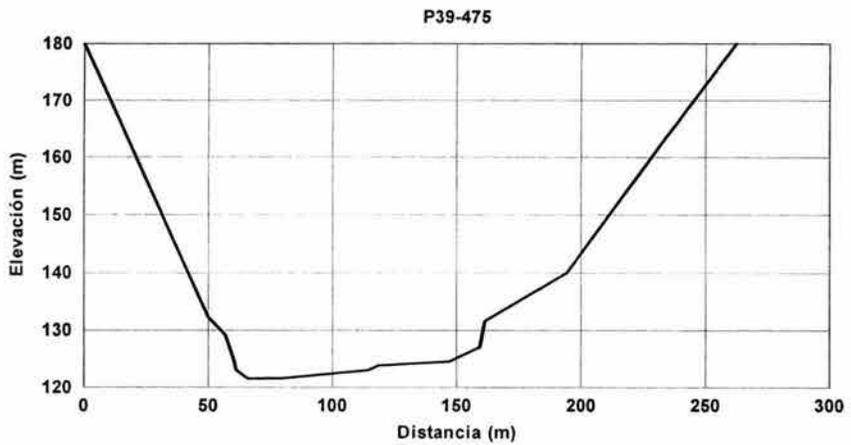
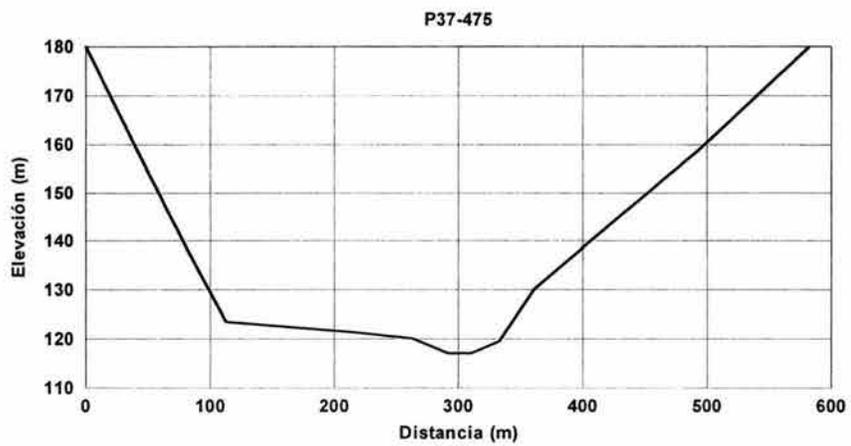
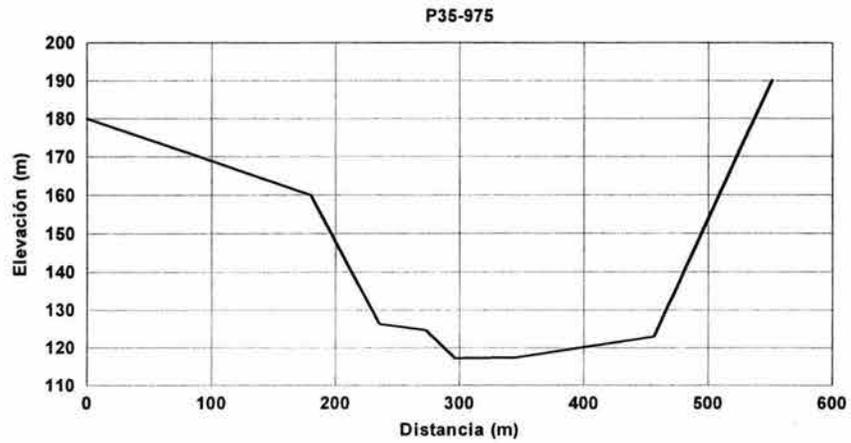


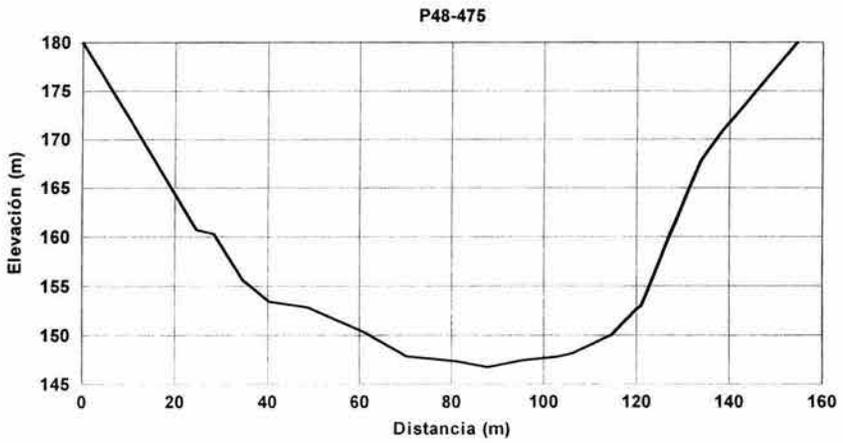
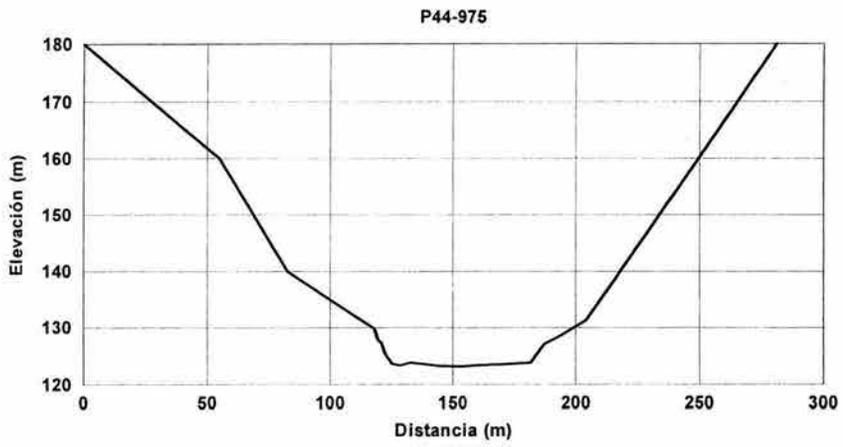
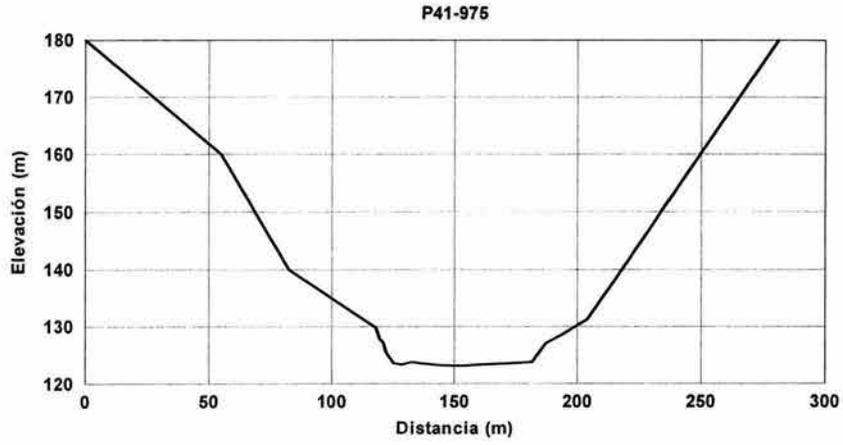




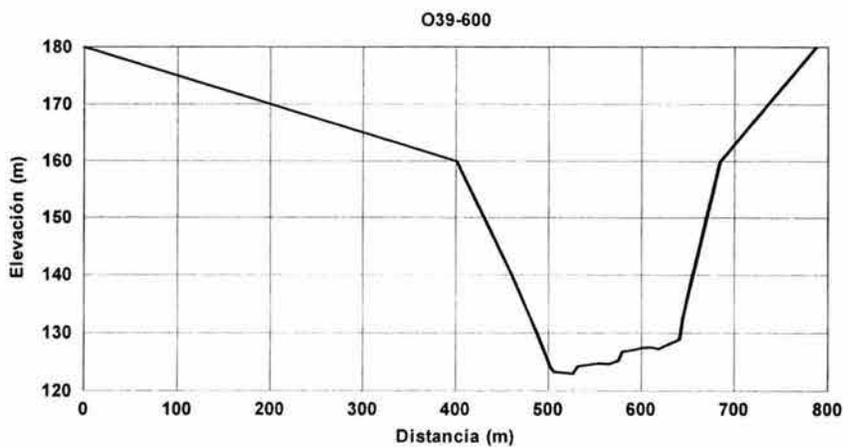
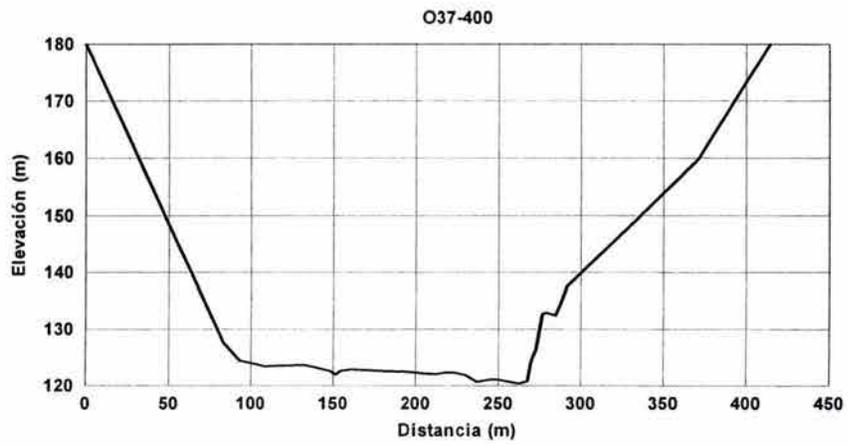
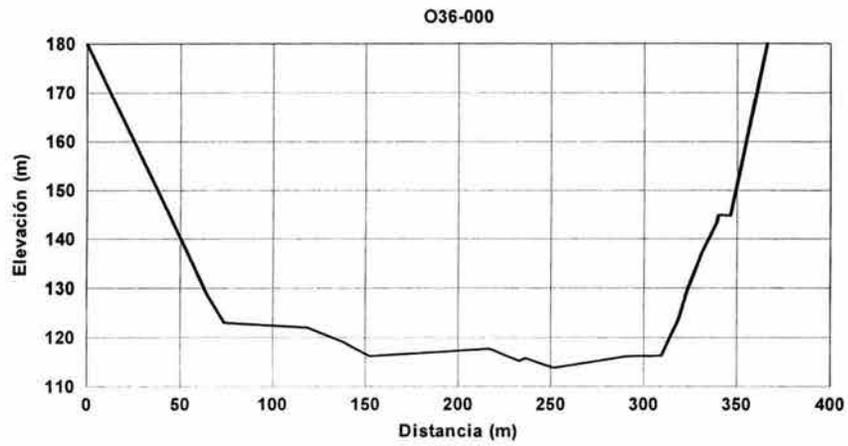


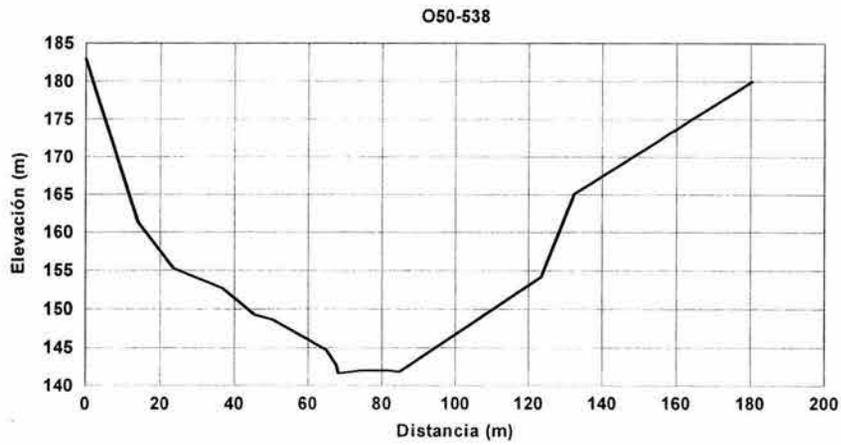
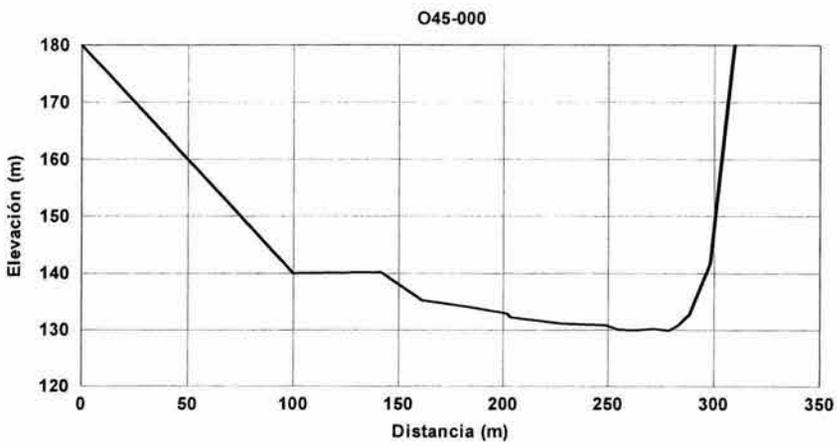
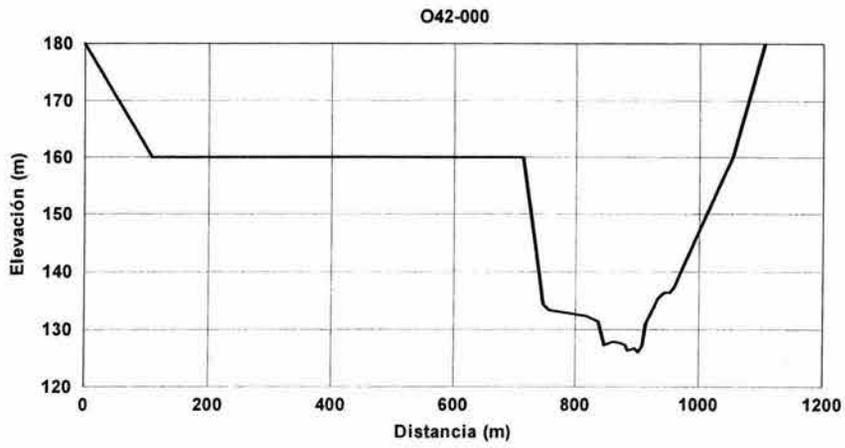
Secciones en el río Papagayo

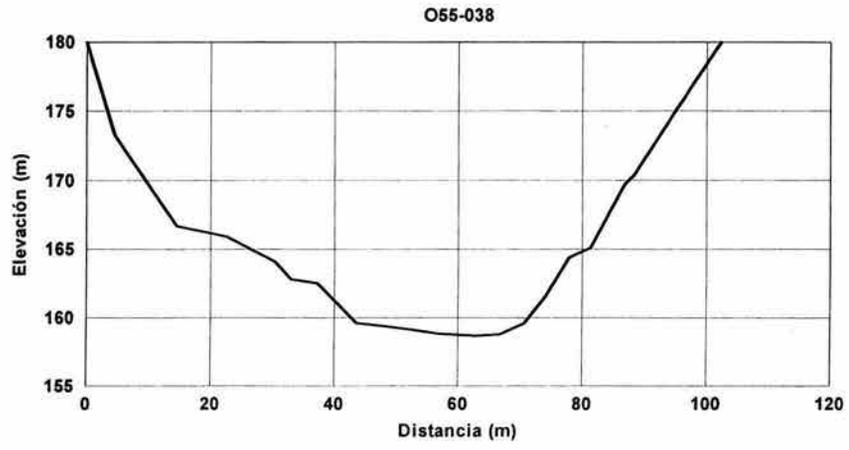




Secciones en el río Omitlán







APÉNDICE B

Perfiles de concentración para los distintos tipos de material analizados

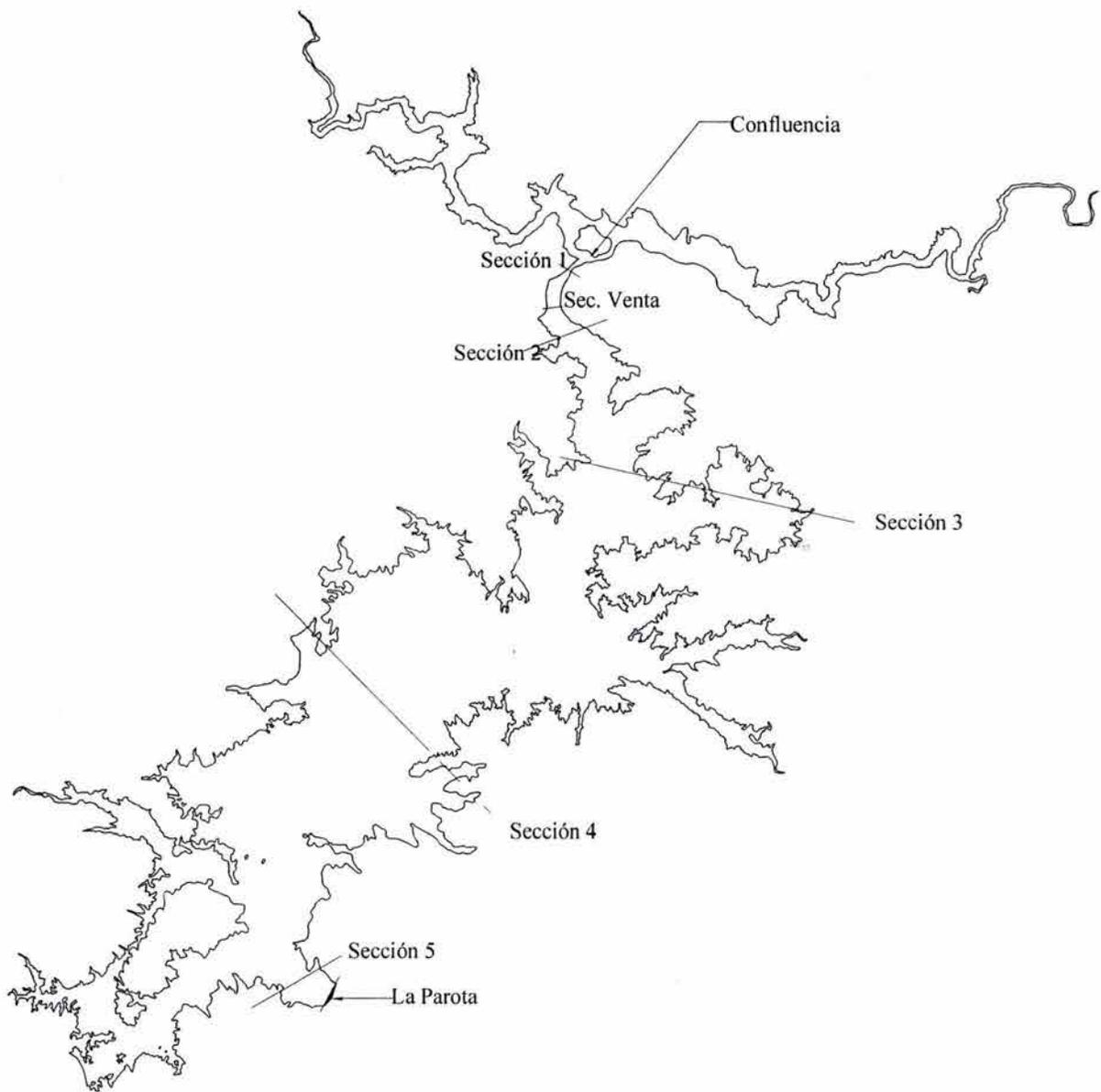


Figura B.1 Ubicación de las secciones correspondientes a los perfiles de concentración mostrados en éste apéndice

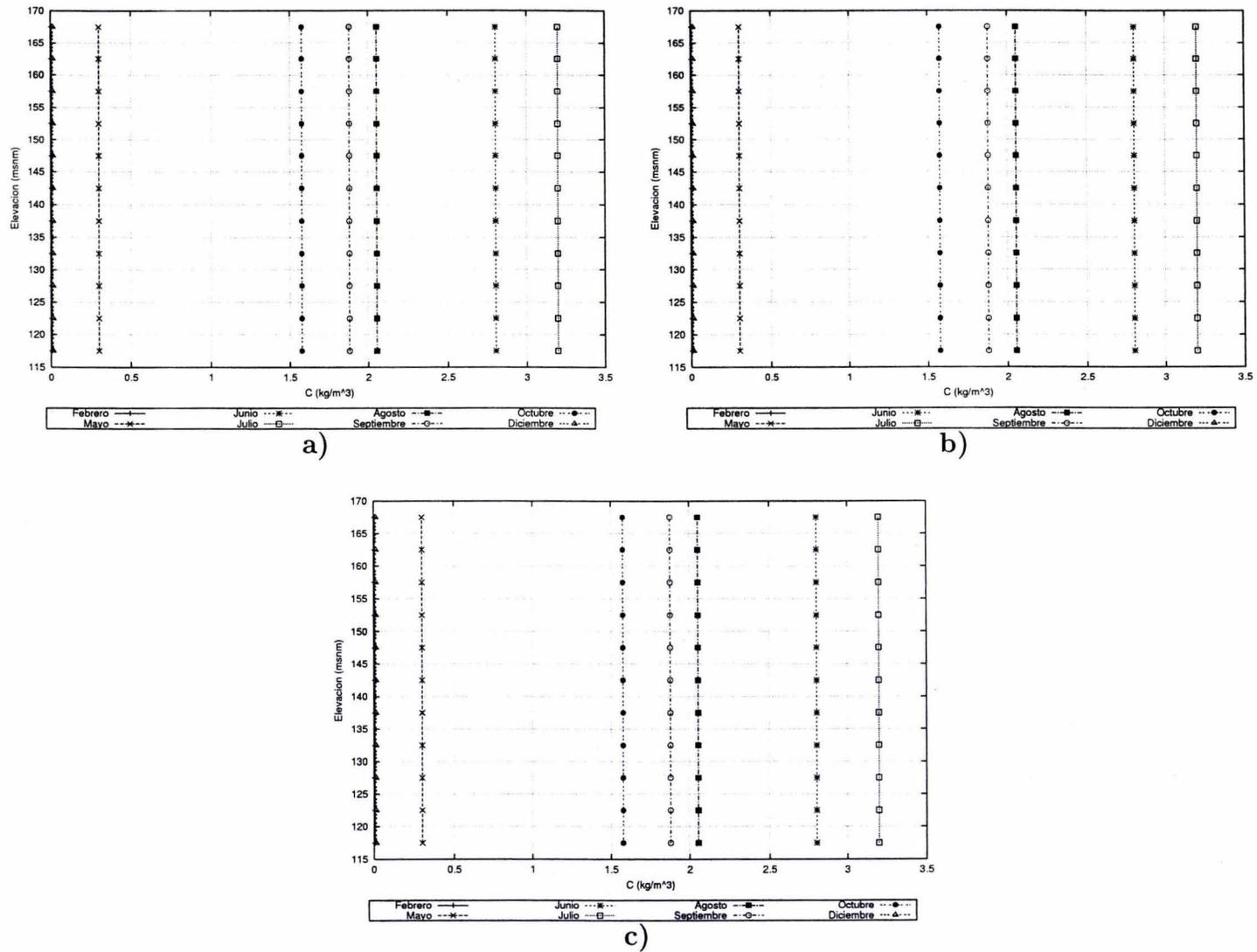


Figura B.2 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ en la sección 1 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

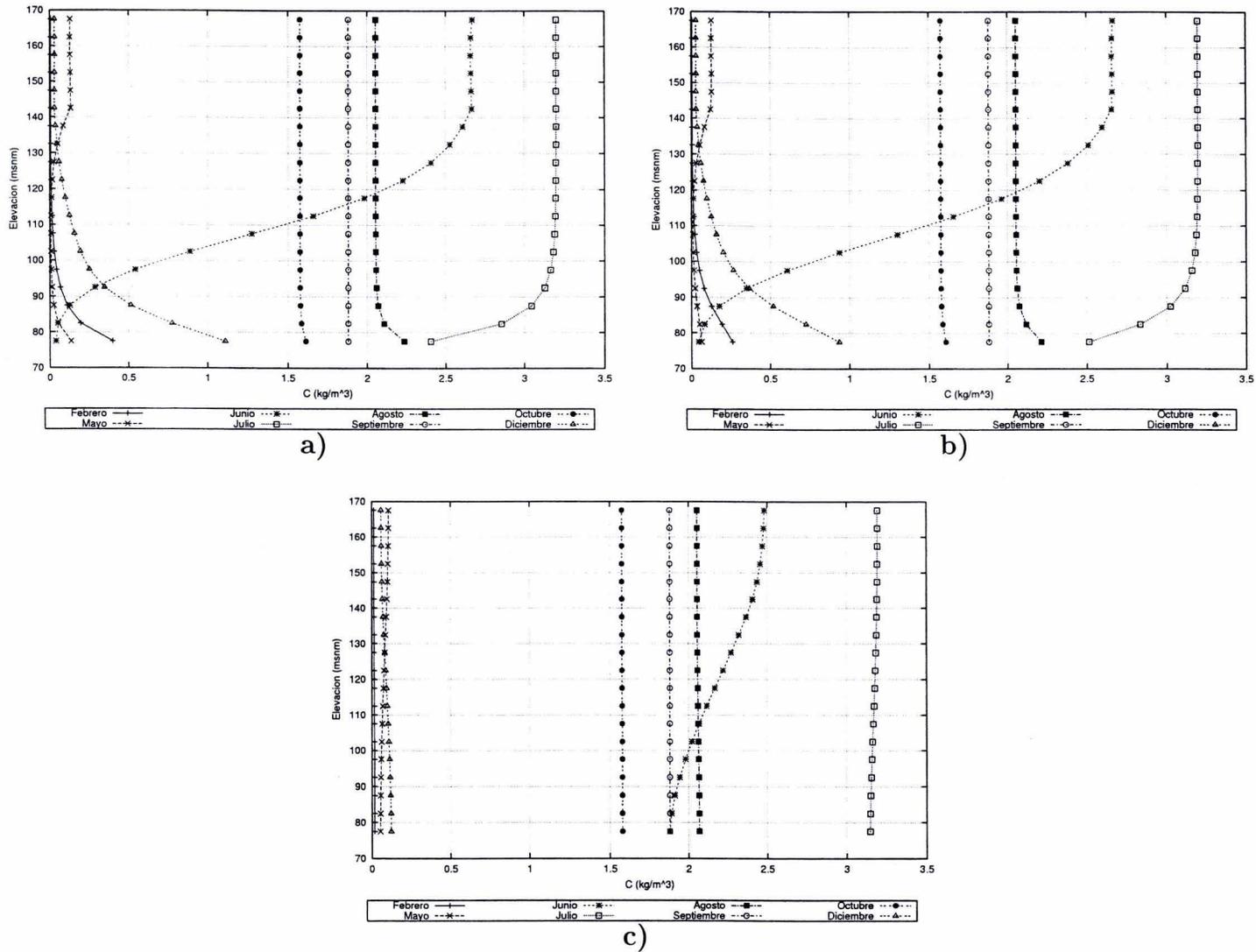


Figura B.3 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-12}$ m/s en la sección 2 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{cm}^2/\text{s}$

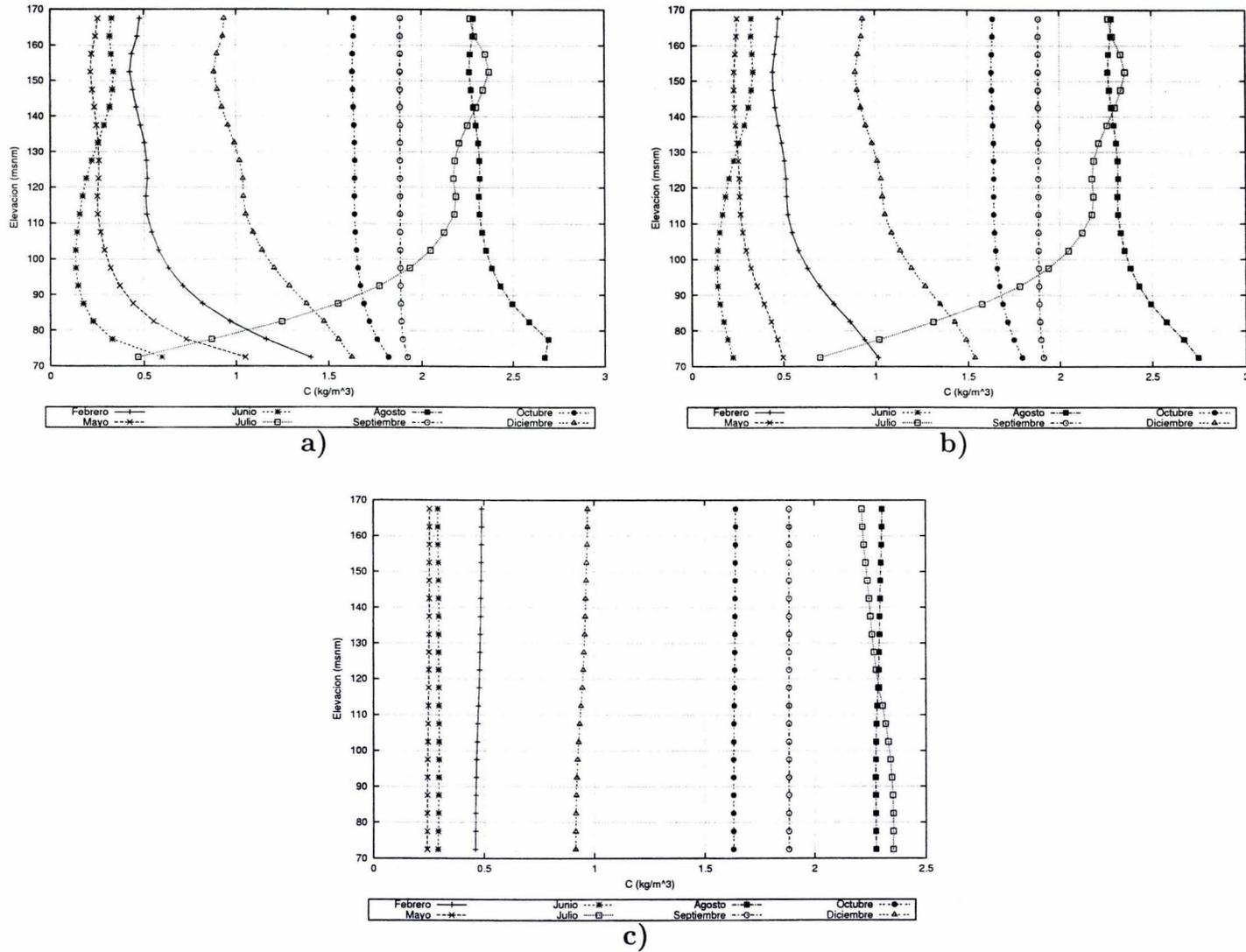


Figura B.4 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-12}$ m/s en la sección 3 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{cm}^2/\text{s}$

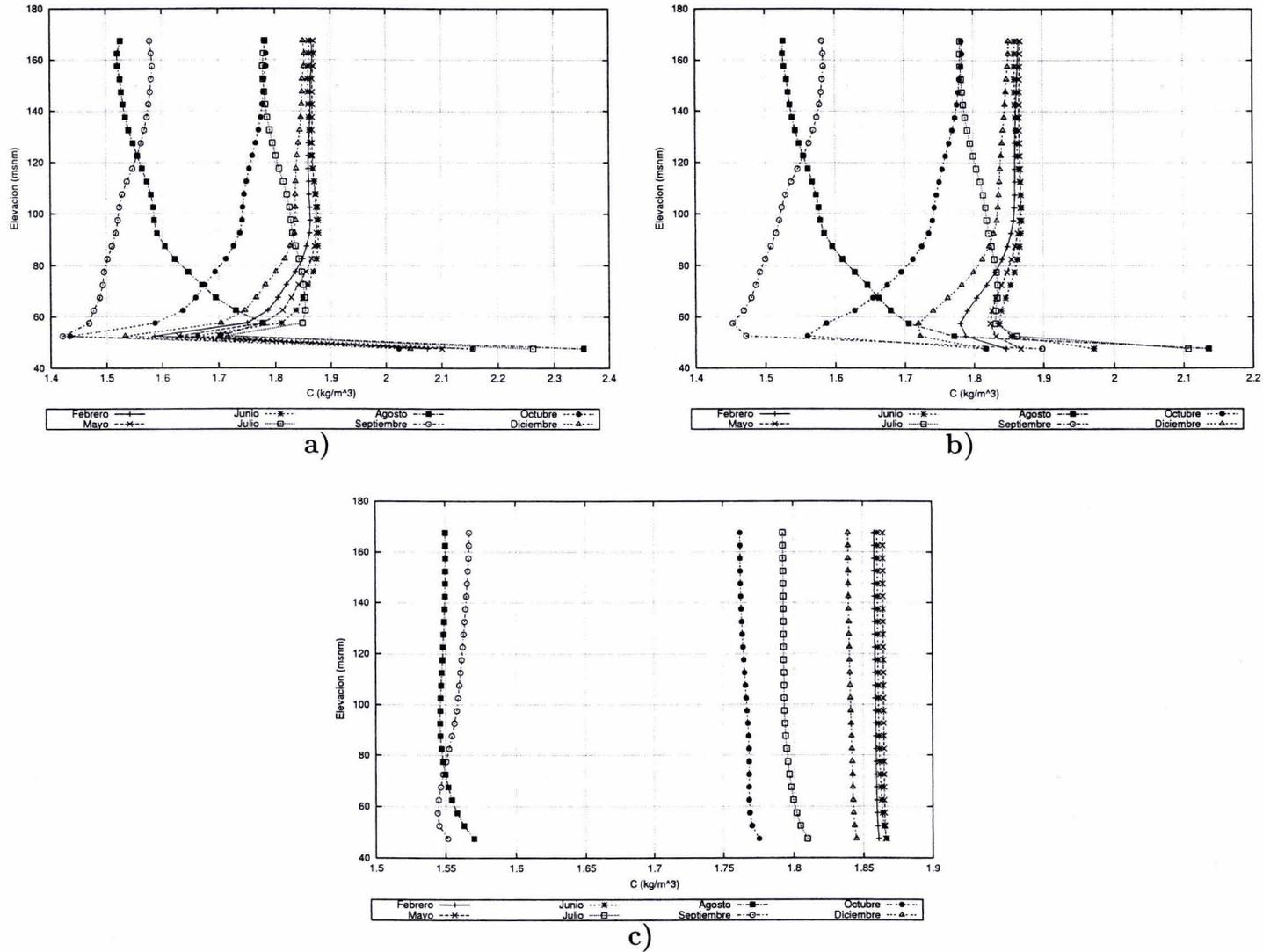


Figura B.5 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-12}$ m/s en la sección 4 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

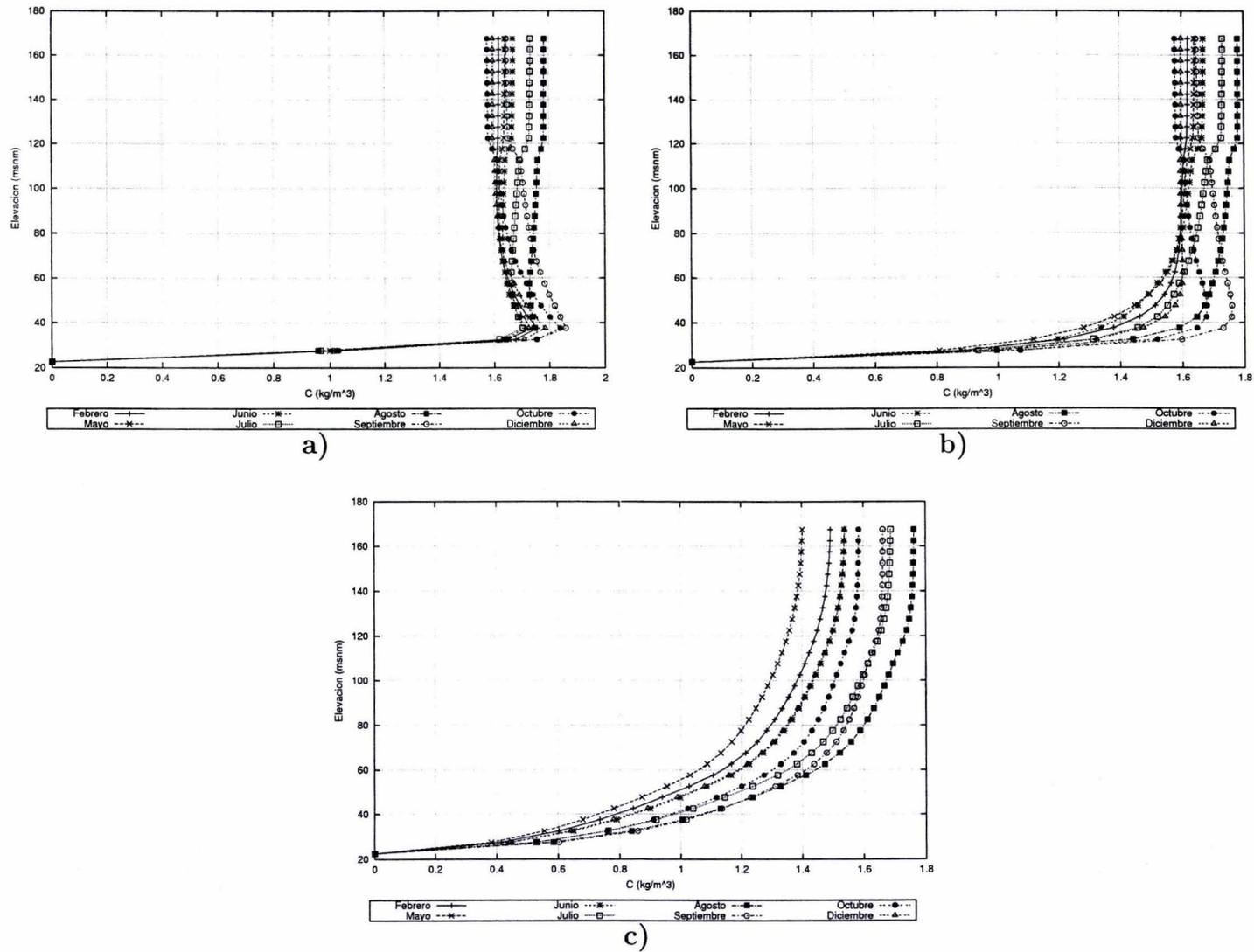


Figura B.6 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-12}$ m/s en la sección 5 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

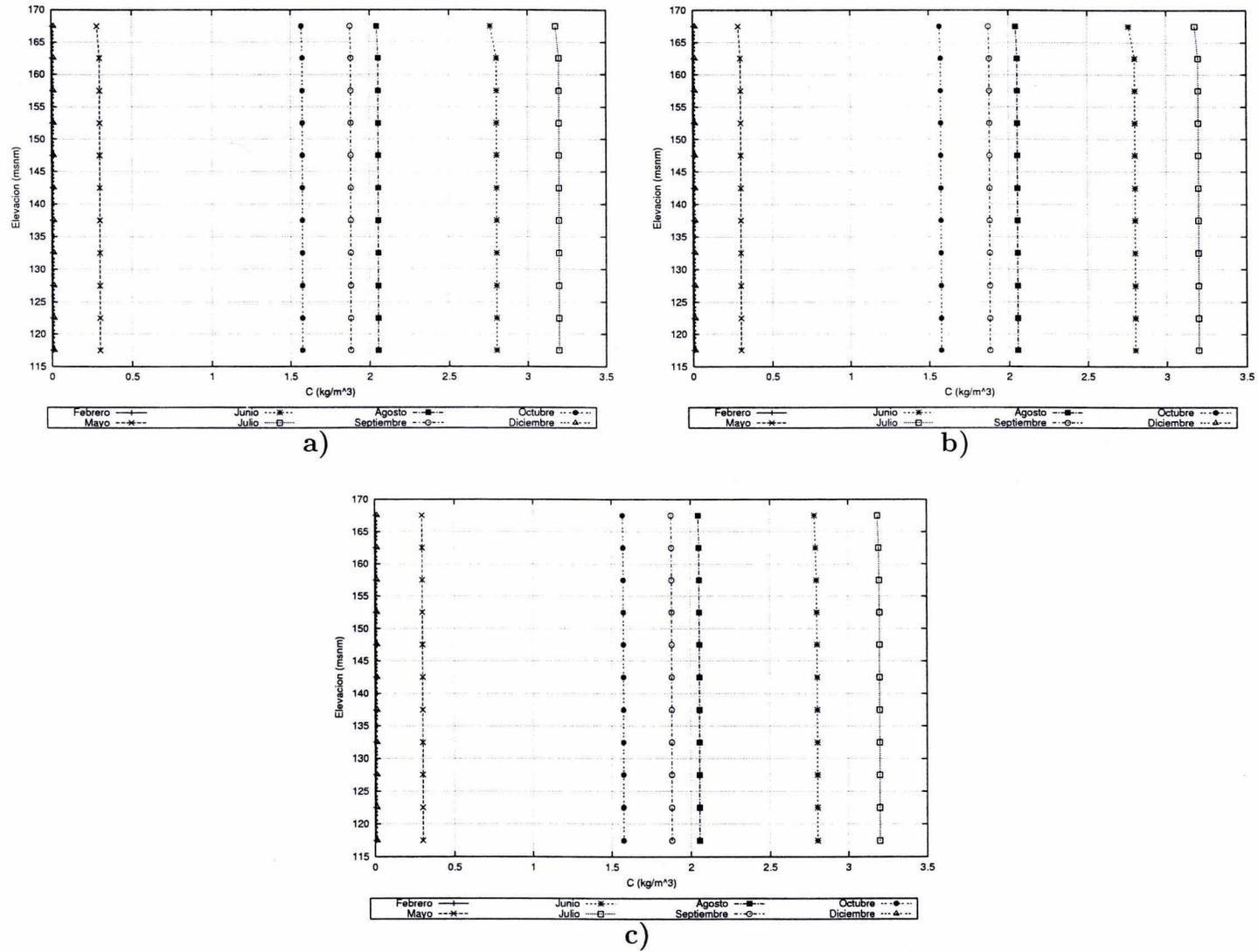


Figura B.7 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ en la sección 1 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

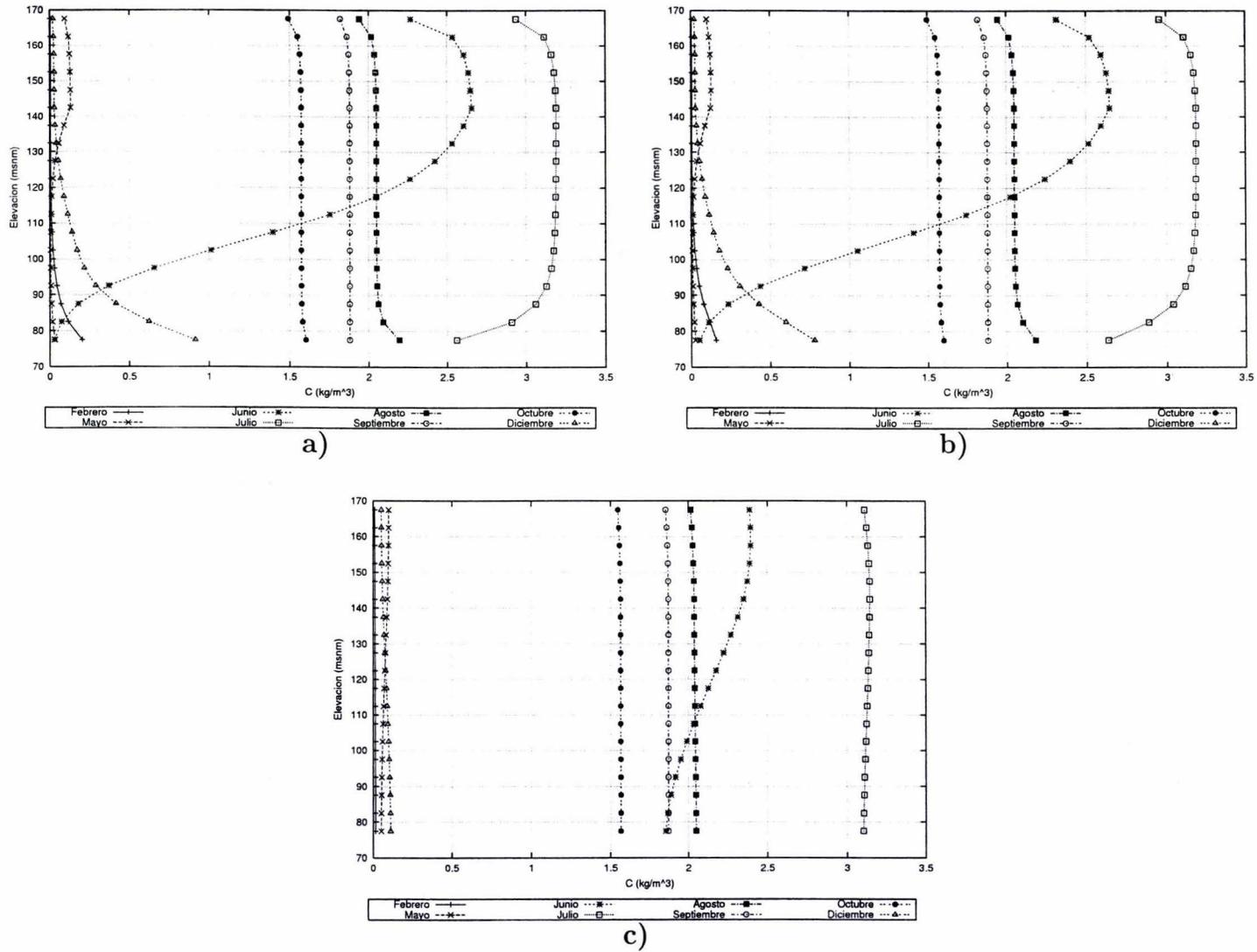


Figura B.8 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-6}$ m/s en la sección 2 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{cm}^2/\text{s}$

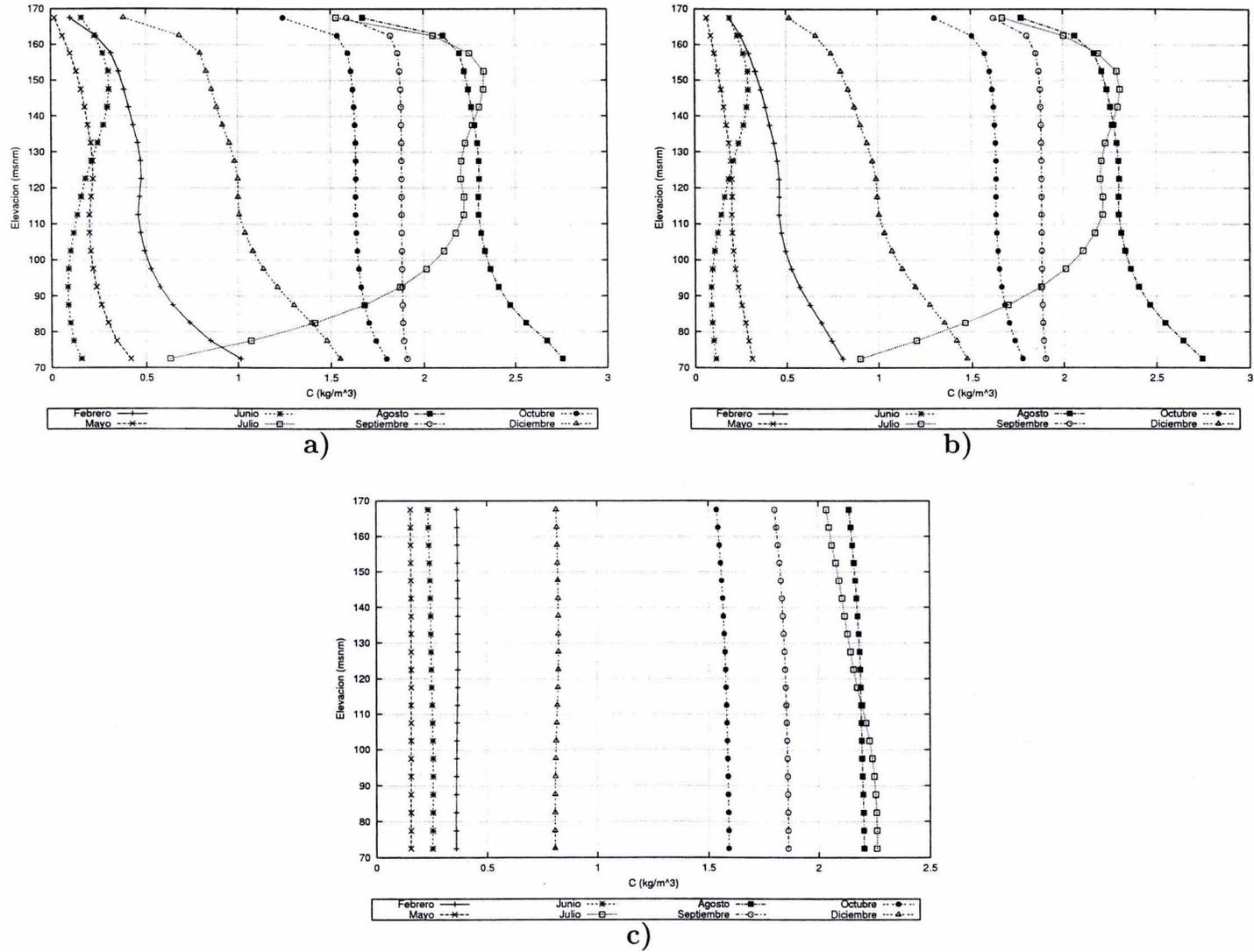


Figura B.9 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ en la sección 3 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

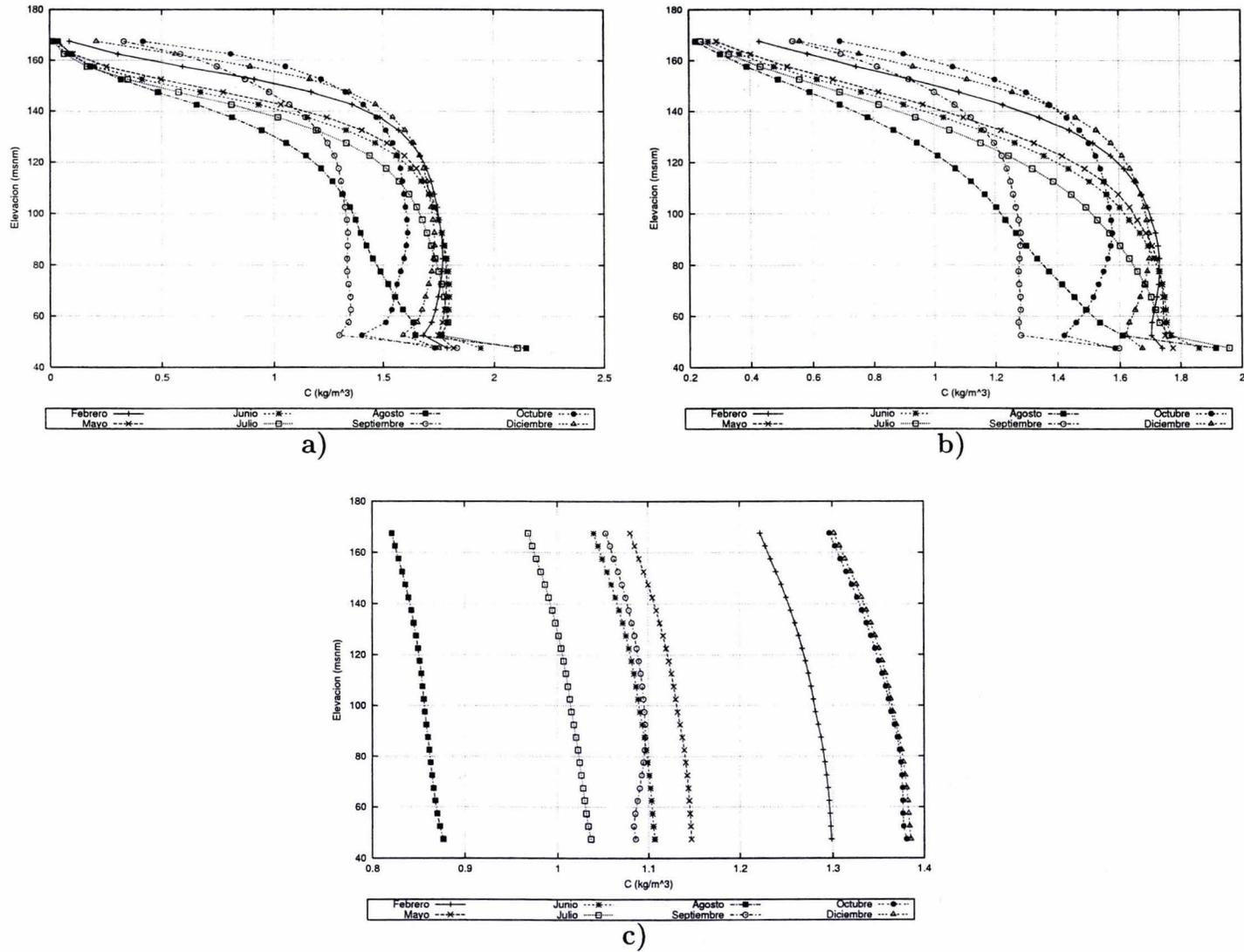


Figura B.10 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-6}$ m/s en la sección 4 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

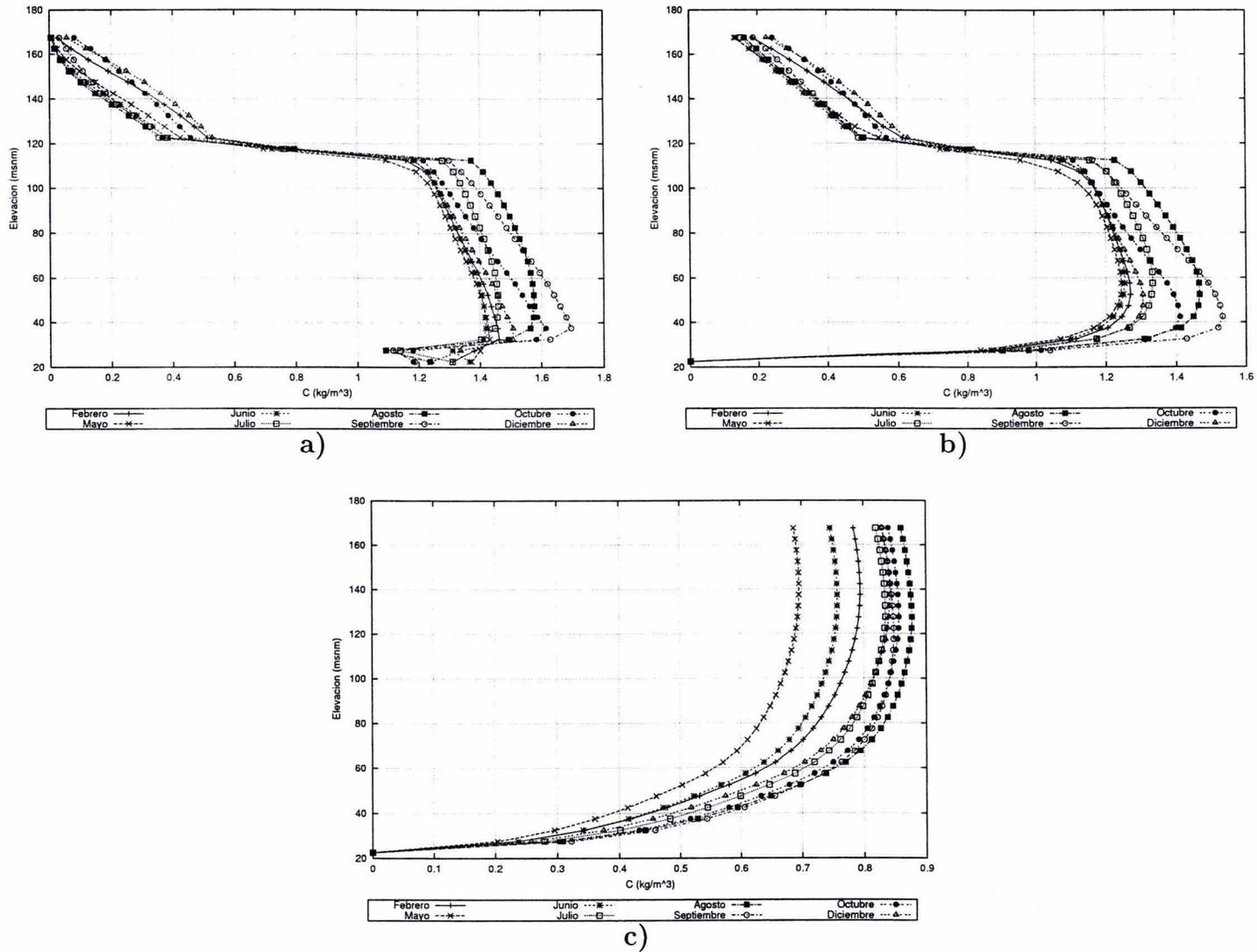


Figura B.11 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ en la sección 5 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

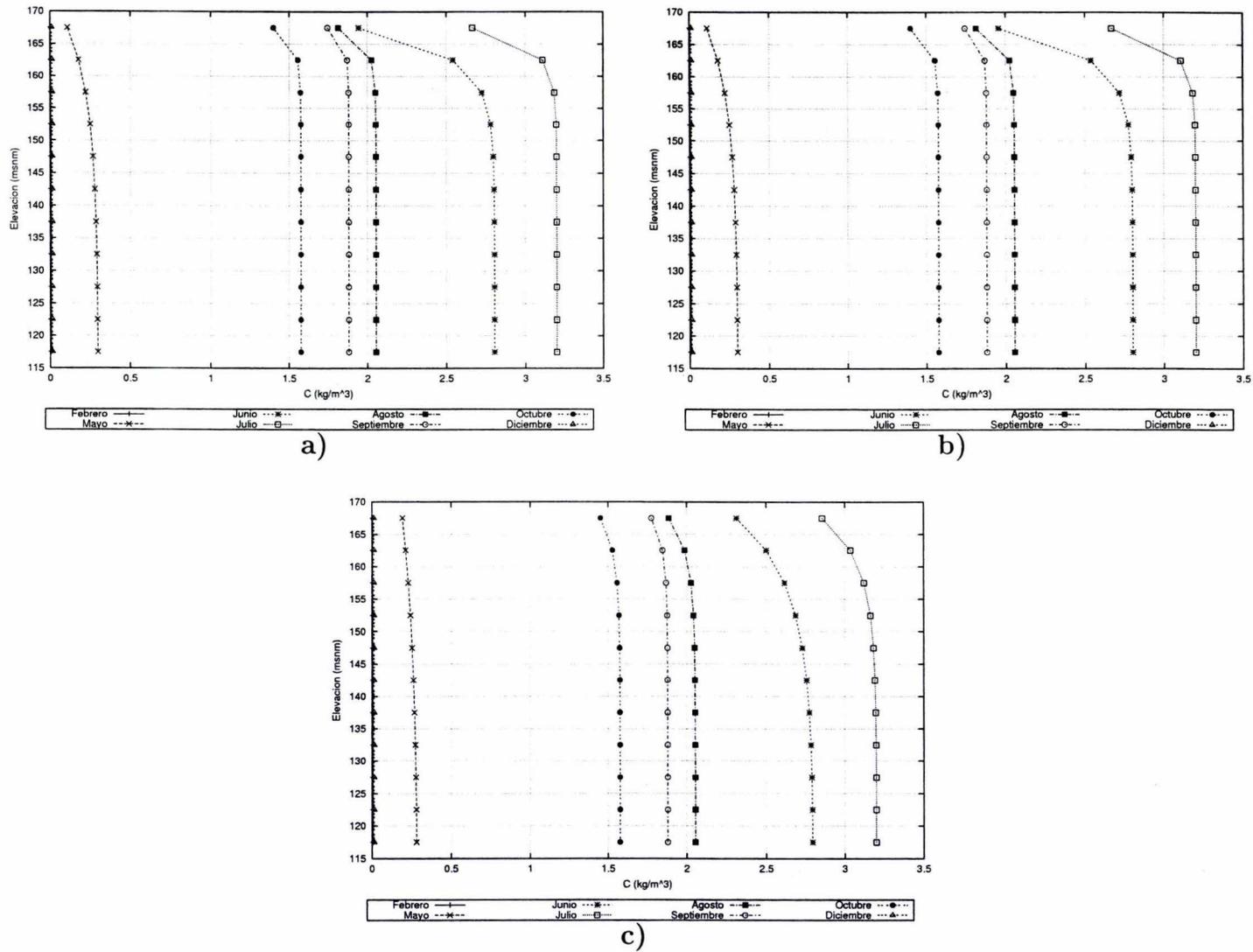


Figura B.12 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 3 \times 10^{-5}$ m/s en la sección 1 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

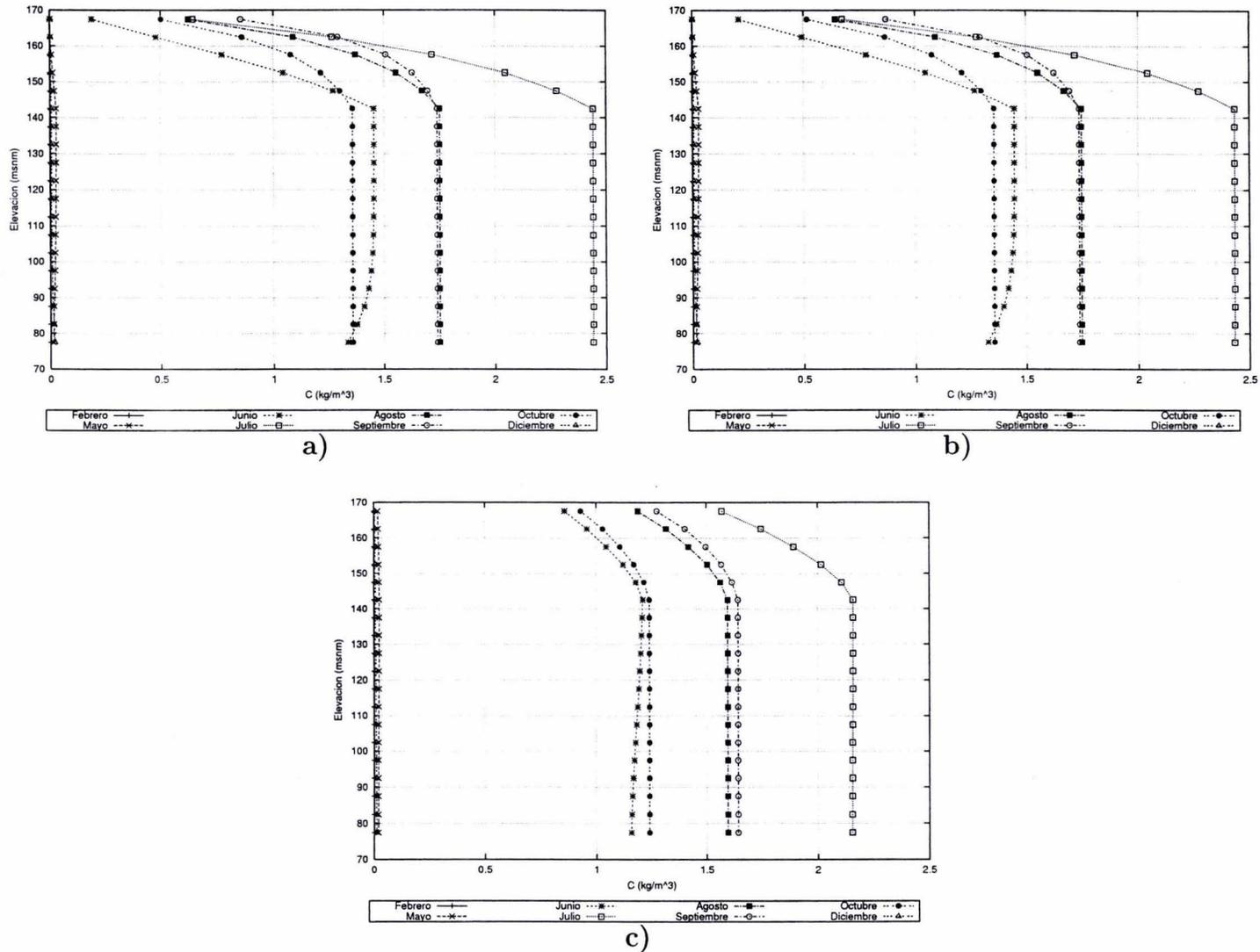


Figura B.13 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_0 = 3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ en la sección 2 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

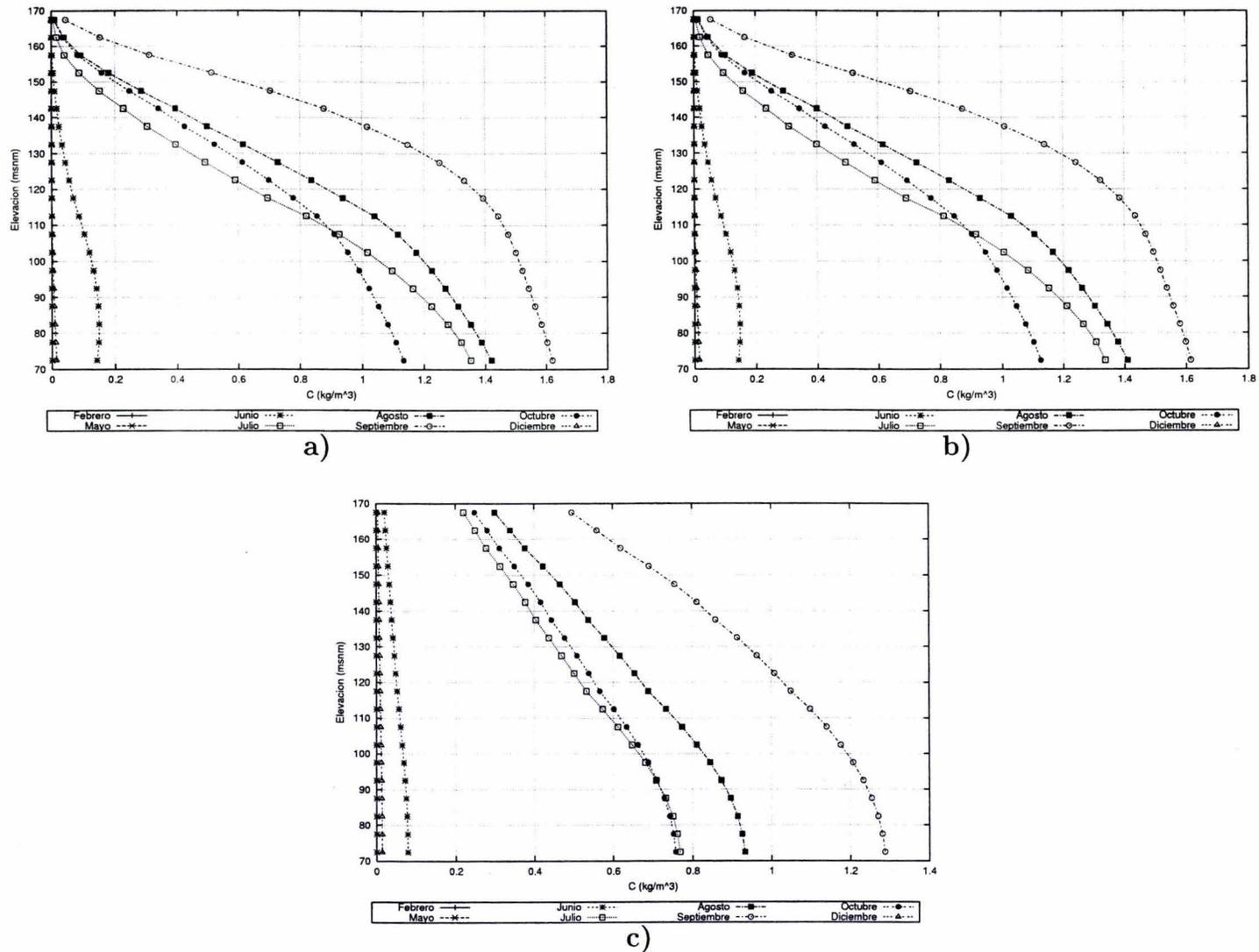


Figura B.14 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 3 \times 10^{-5}$ m/s en la sección 3 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

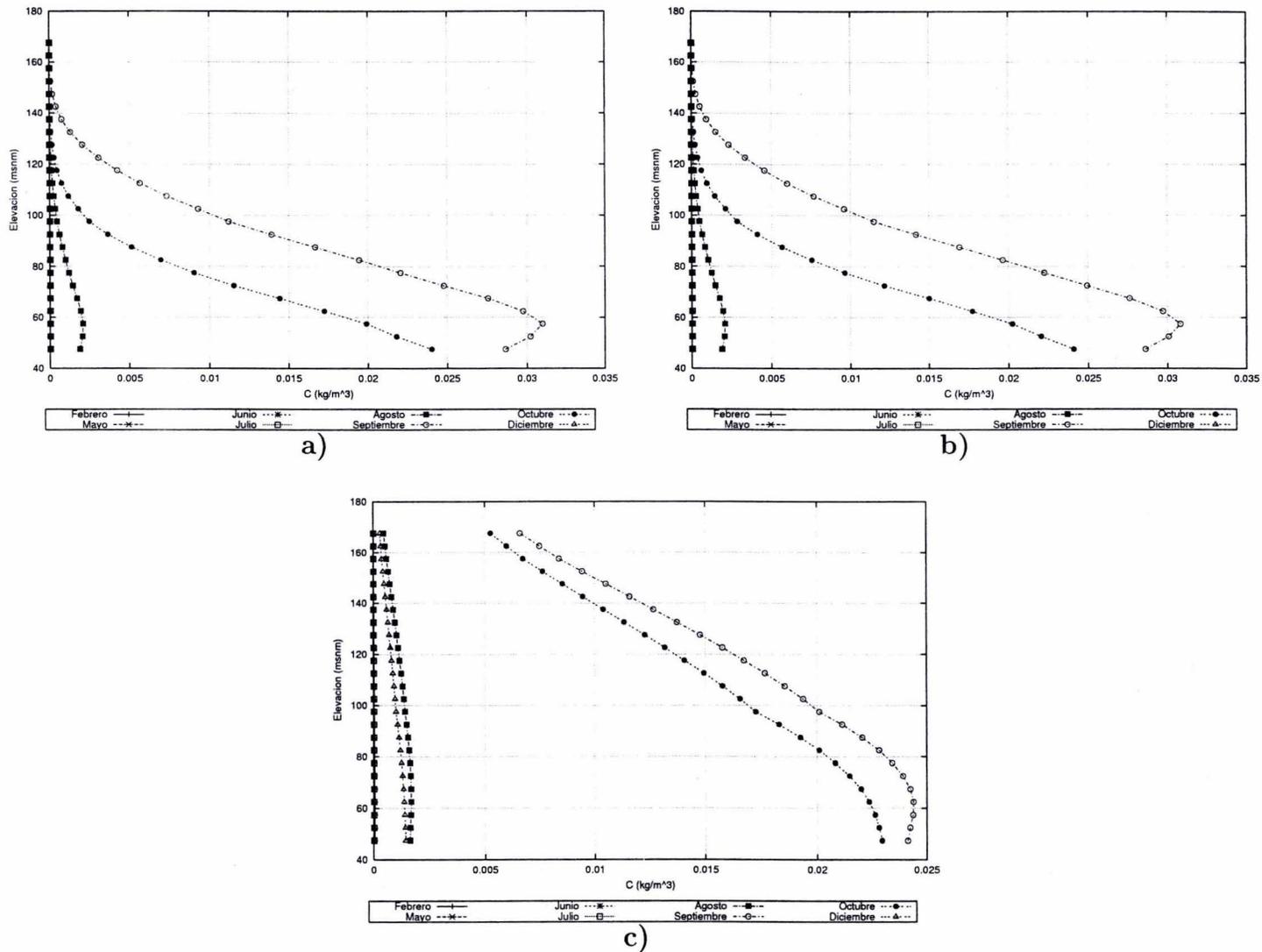


Figura B.15 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ en la sección 4 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

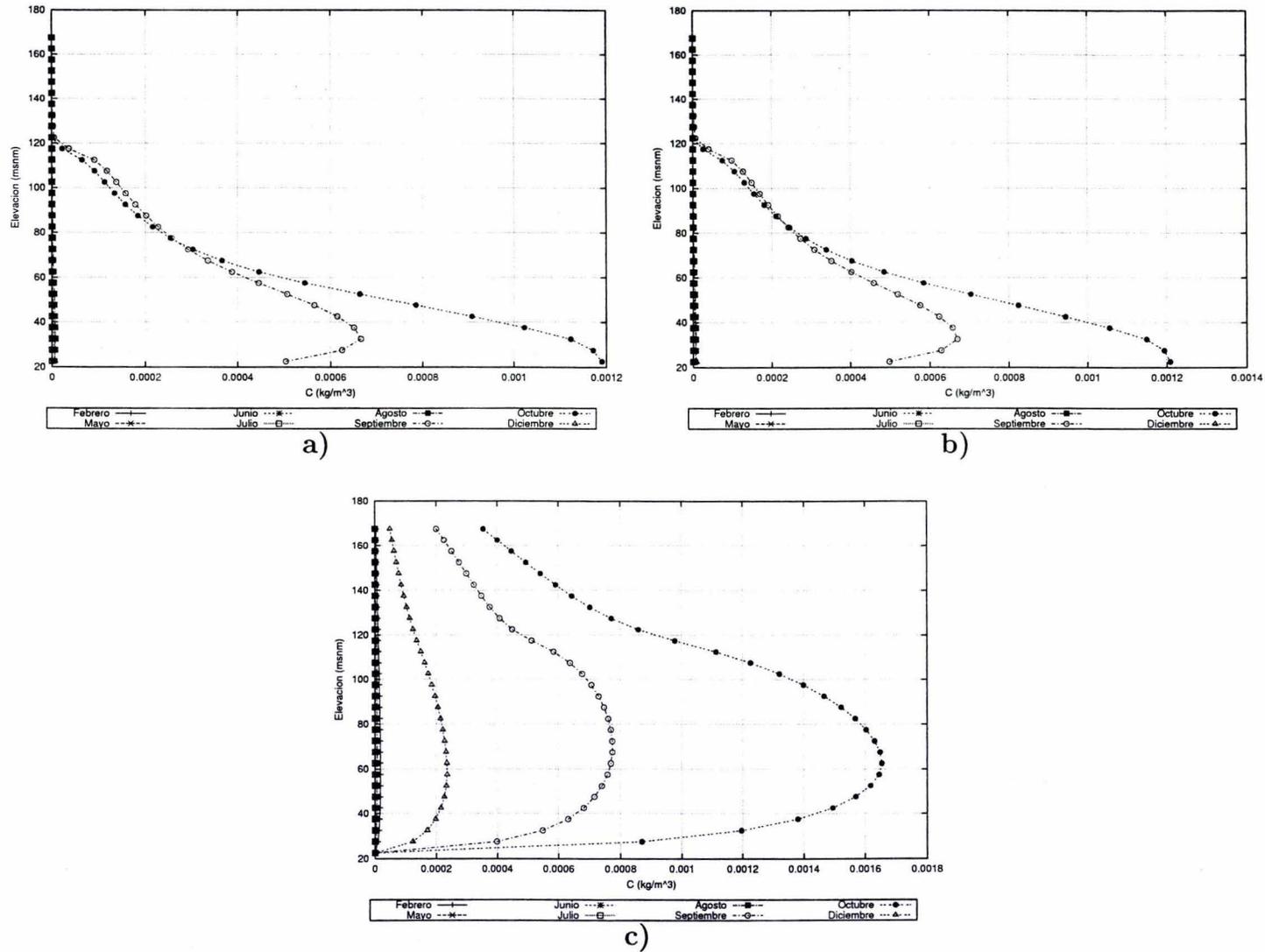
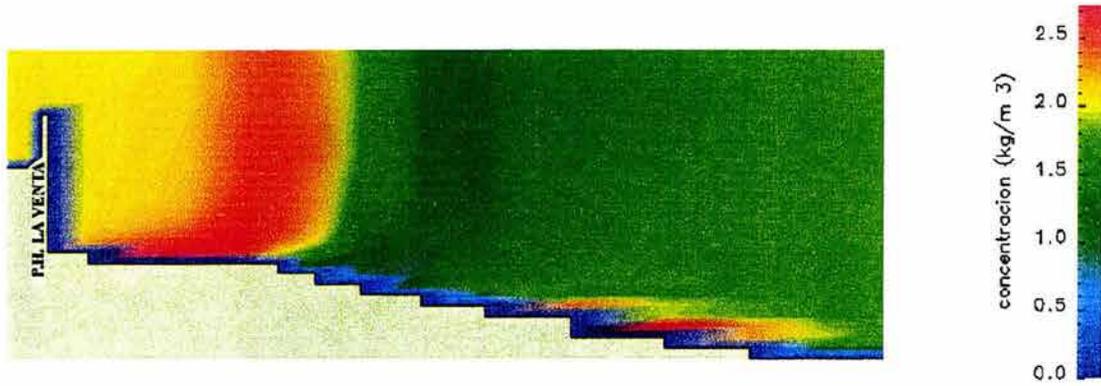


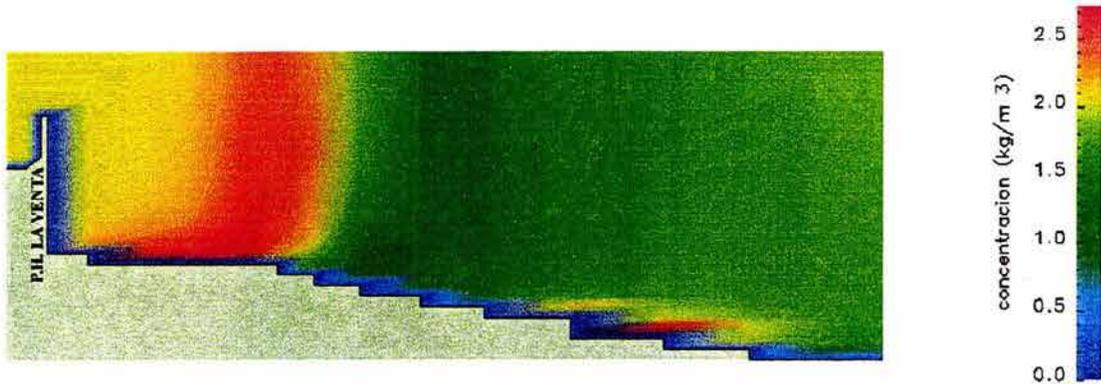
Figura B.16 Perfiles de concentración para el material con velocidad de caída $w_o = 3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ en la sección 5 para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

APÉNDICE C

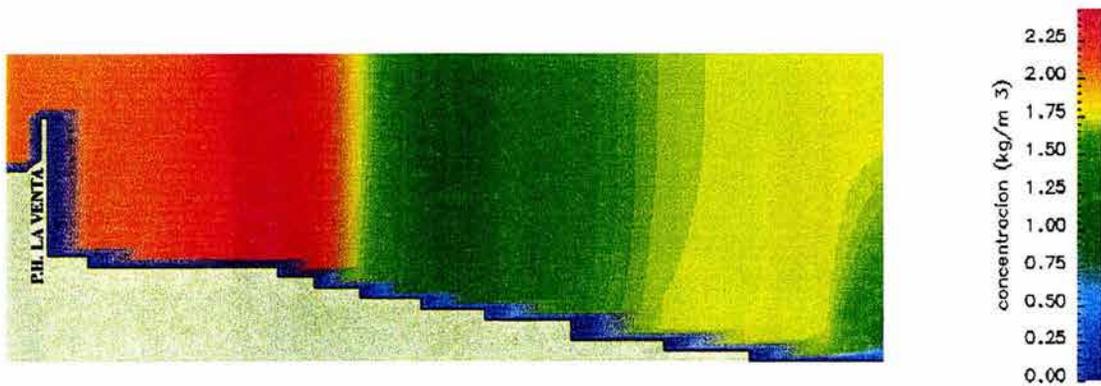
Distribución de la concentración de sedimentos en el embalse



a)

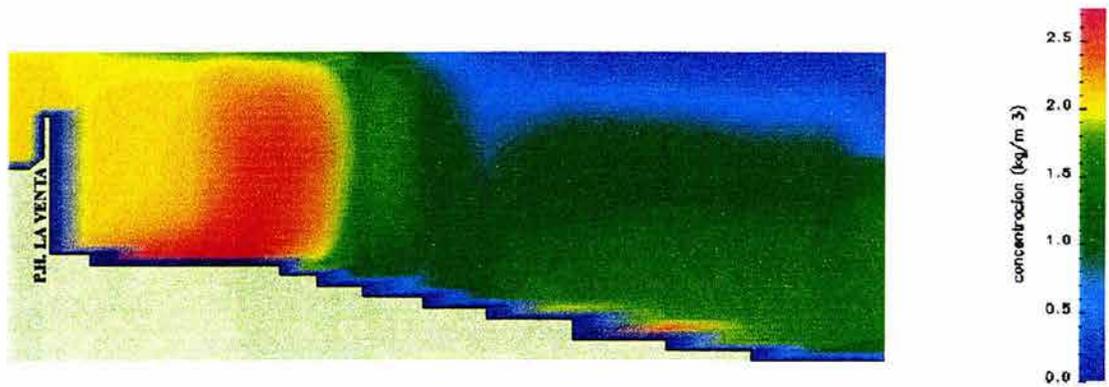


b)

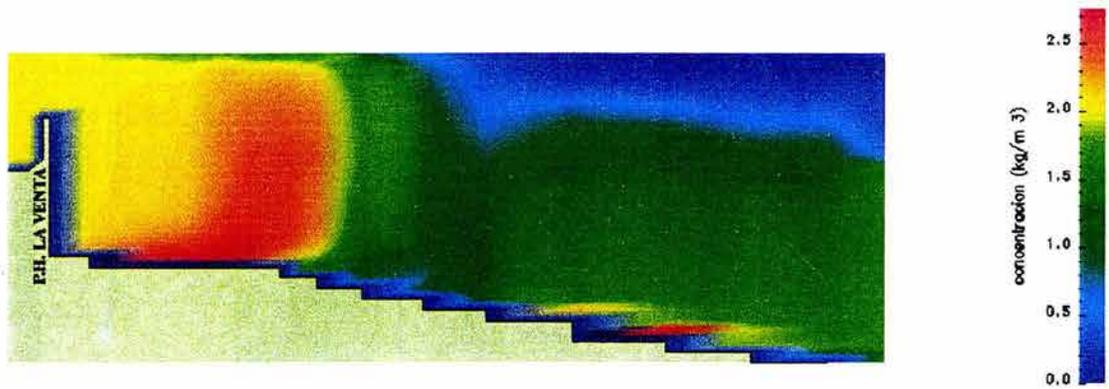


c)

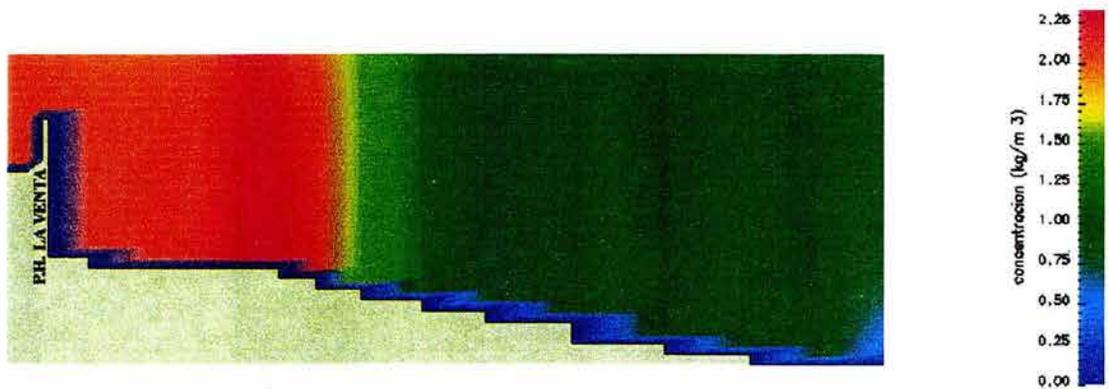
Figura C.1 Distribución de concentración a lo largo de todo el embalse para el material con velocidad de caída $w_0 = 1 \times 10^{-12}$ m/s para:
a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3}$ cm²/s, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1}$ cm²/s y c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1$ cm²/s



a)



b)



c)

Figura C.2 Distribución de concentración a lo largo de todo el embalse para el material con velocidad de caída $w_0 = 1 \times 10^{-6}$ m/s para:
a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3}$ cm²/s, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1}$ cm²/s y c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1$ cm²/s

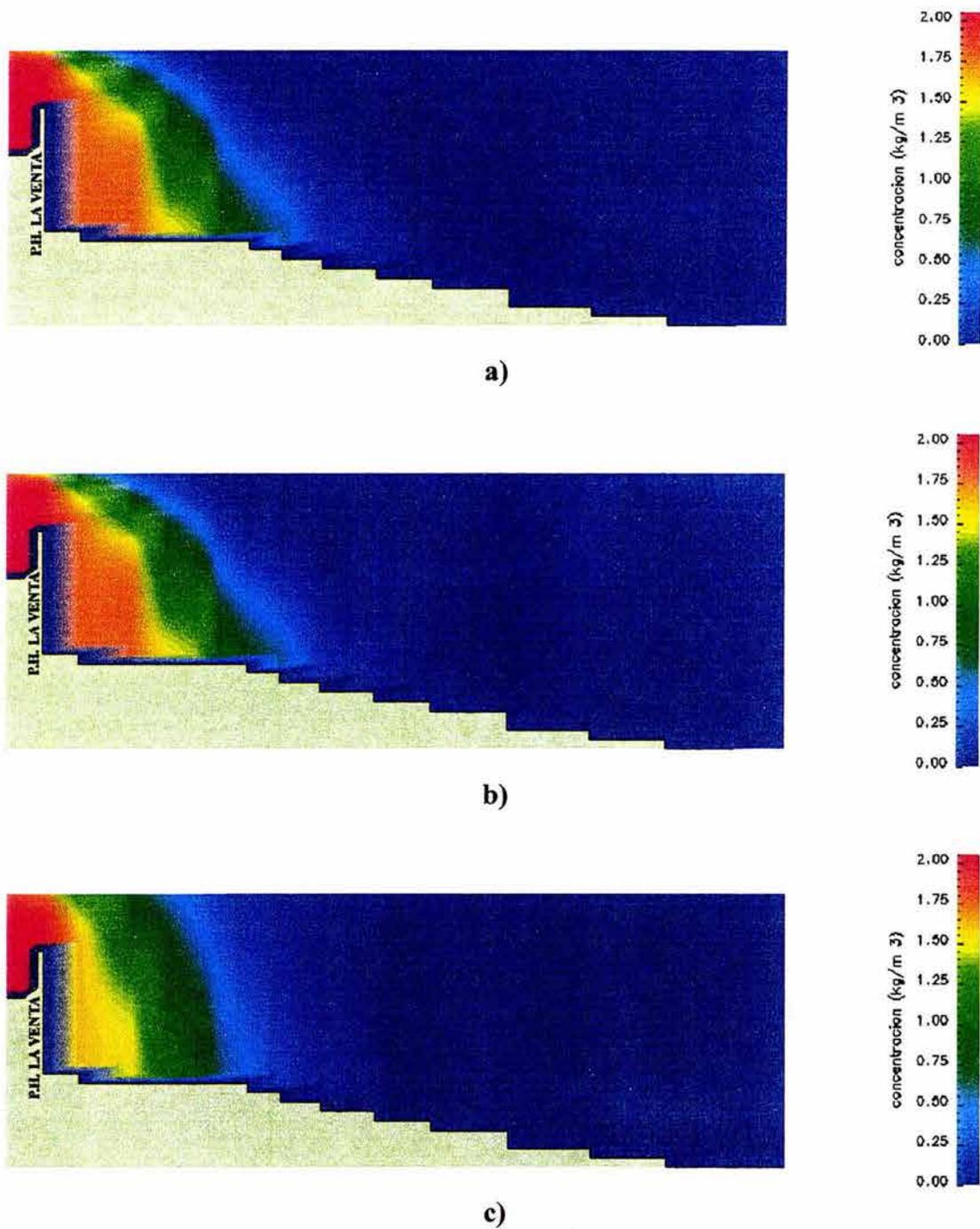


Figura C.3 Distribución de concentración a lo largo de todo el embalse para el material con velocidad de caída $w_0 = 3 \times 10^{-5}$ m/s para:
 a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3}$ cm²/s, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1}$ cm²/s y c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1$ cm²/s

APÉNDICE D

Depósito del material sólido producto de la turbidez

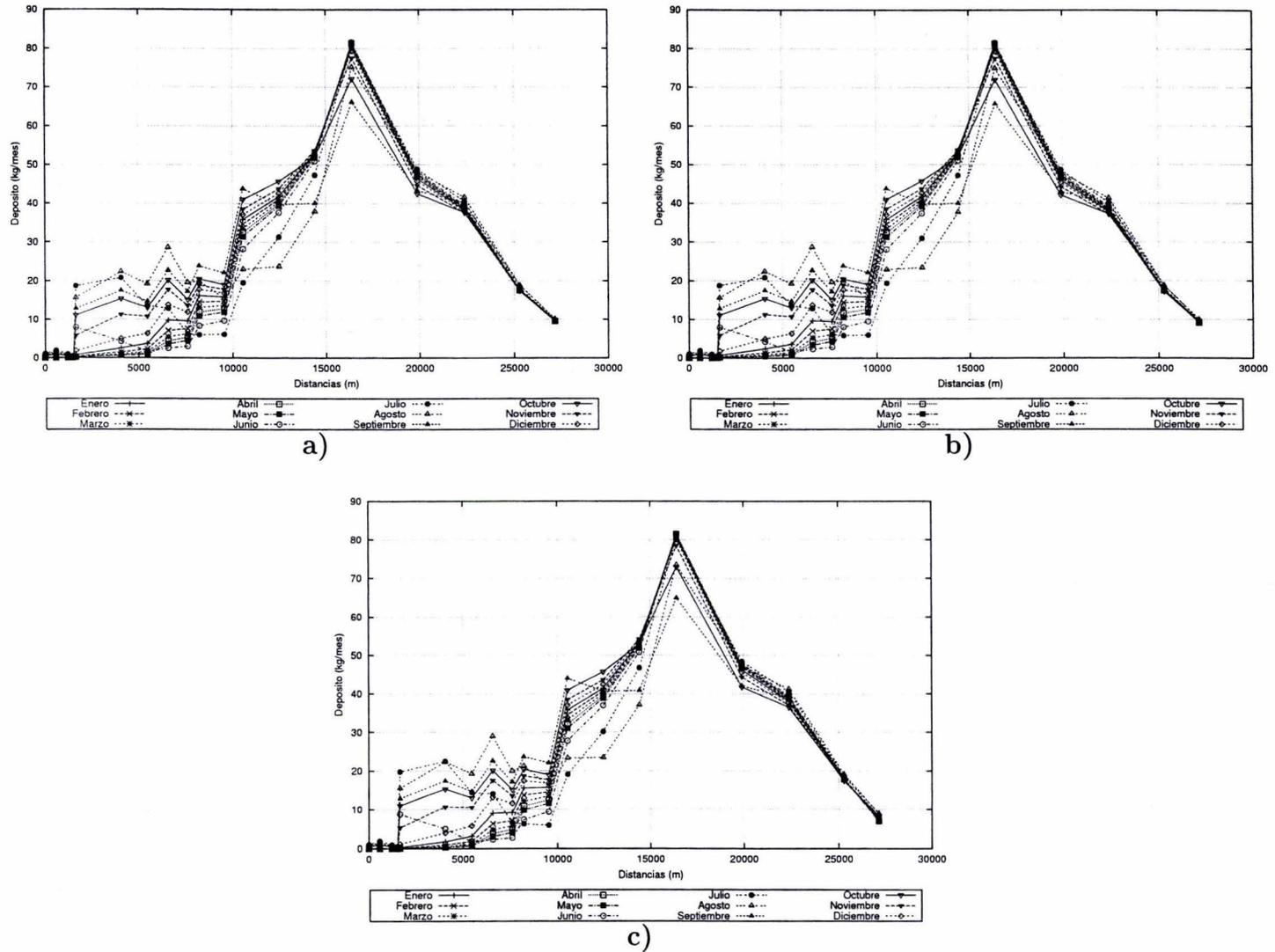


Figura D.1 Depósito mensual para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ desde la confluencia de los ríos Omitlán y Papagayo hasta el P. H. La Parota para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

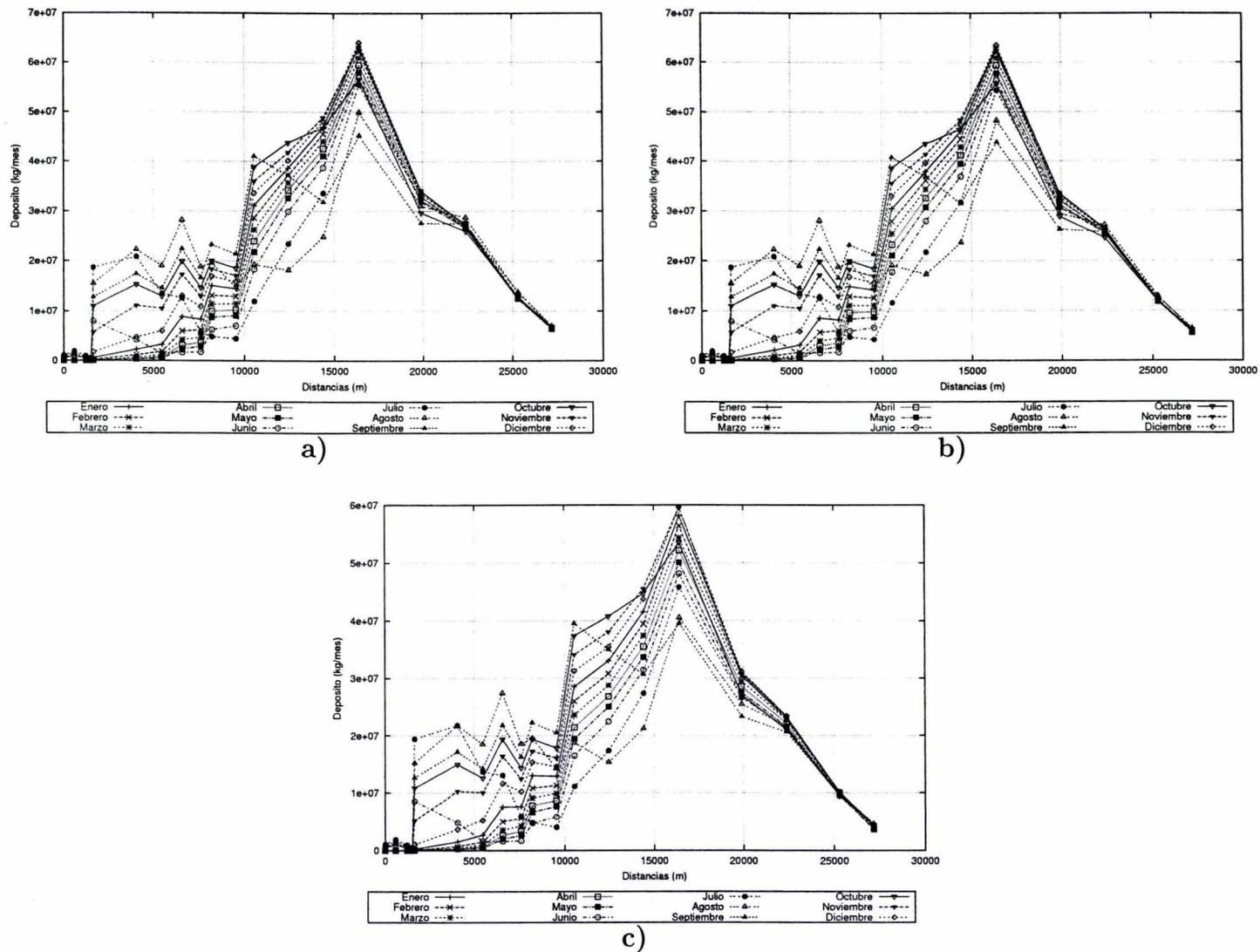


Figura D.2 Depósito mensual para el material con velocidad de caída $w_o = 1 \times 10^{-6}$ m/s desde la confluencia de los ríos Omitlán y Papagayo hasta el P. H. La Parota para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

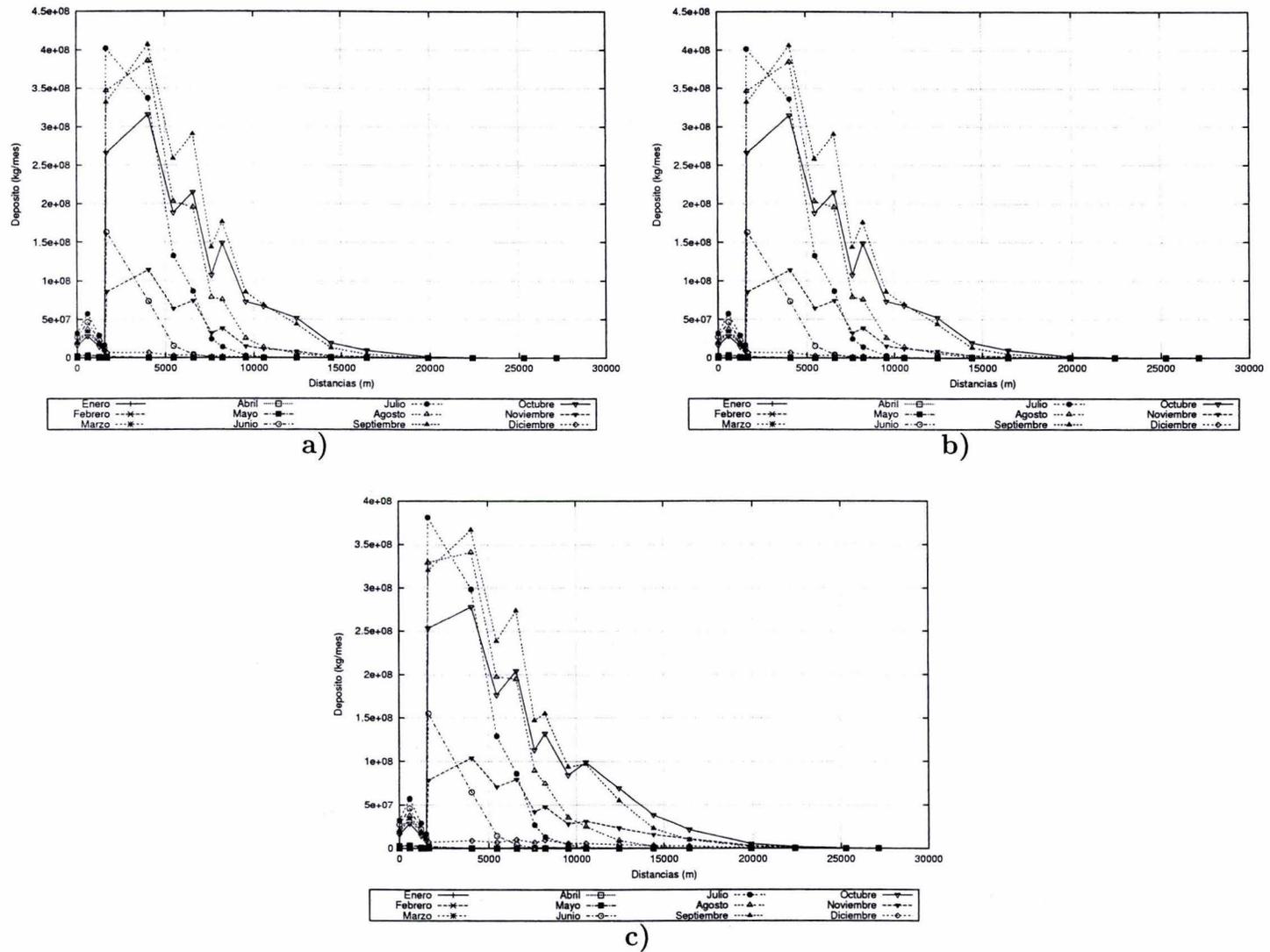


Figura D.3 Depósito mensual para el material con velocidad de caída $w_o = 3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ desde la confluencia de los ríos Omitlán y Papagayo hasta el P. H. La Parota para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

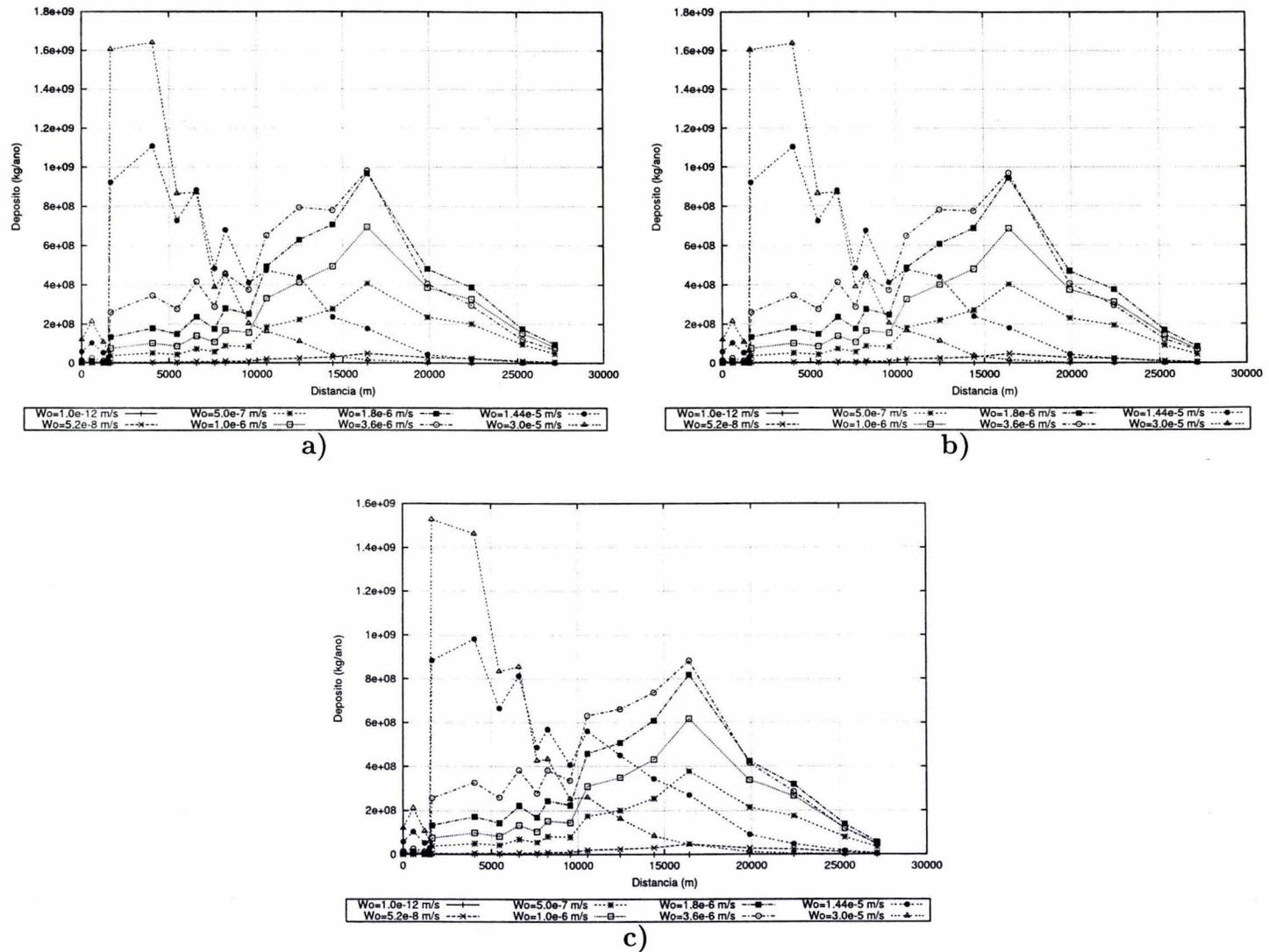


Figura D.4 Depósito anual para las ocho velocidades de caída, desde la confluencia de los ríos Omitlán y Papagayo hasta el P. H. La Parota para: a) $\alpha_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, b) $\alpha_2 = 1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, c) $\alpha_3 = 1 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$

APÉNDICE E

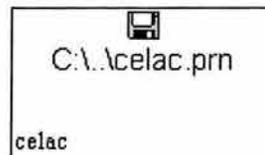
**Programa para la adquisición de los datos de la malla de cálculo.
(datos-venta-parota.mcd)**

obra de toma

$$\text{celac}_{11,20} := 1$$

$$\text{AMI} := \begin{cases} \text{for } i \in 1.. \text{NR} \\ \quad \text{for } j \in 1.. \text{NC} \\ \quad \quad \begin{cases} r_{i,j} \leftarrow \text{AMS}_{i,j} & \text{if } \text{celac}_{i,j} = 1 \\ r_{i,j} \leftarrow 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ r \end{cases}$$

Archivo donde queda guardada la matriz de celdas activas (celdas donde se hacen calculos)



$$\text{AMI}_{11,20} := 531.221 \quad \text{AMI}_{25,15} := \text{AMI}_{24,15} \quad \text{AMI}_{27,16} := \text{AMI}_{26,16}$$

$$\text{AMI}_{30,19} := \text{AMI}_{29,19}$$

$$\text{AMD} := \begin{cases} \text{for } i \in 1.. \text{NR} \\ \quad \text{for } j \in 1.. \text{NC} \\ \quad \quad \begin{cases} r_{i,j} \leftarrow \text{AMS}_{i,j+1} & \text{if } \text{celac}_{i,j} = 1 \\ r_{i,j} \leftarrow 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ r \end{cases}$$

$$\text{AMD}_{11,20} := 531.221$$

$$\text{AMA} := \begin{cases} \text{for } i \in 1.. \text{NR} \\ \quad \text{for } j \in 1.. \text{NC} \\ \quad \quad \begin{cases} r_{i,j} \leftarrow \text{AMR}_{i,j} & \text{if } \text{celac}_{i,j} = 1 \\ r_{i,j} \leftarrow 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ r \end{cases}$$

$$\text{AMA}_{11,20} := 531.221$$

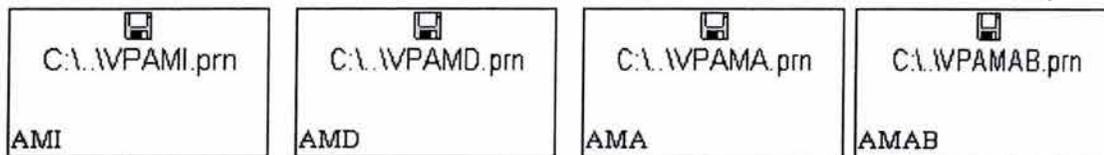
```

AMAB := | for i ∈ 1.. NR
        | for j ∈ 1.. NC
        |   ri,j ← AMRi+1,j if celaci,j = 1
        |   ri,j ← 0 otherwise
        | r

```

$AMAB_{11,20} := 531.221$
 $AMAB_{24,14} := AMAB_{23,14}$
 $AMAB_{29,18} := AMAB_{28,18}$

Archivos con los anchos medios para cada una de las celdas de analisis



Velocidad de caída del material en suspensión (m/s)

velcaida := 0.00003

Coefficiente de difusión (m²/s)

difusion := 0.00001

```

wo := | for i ∈ 1.. NR
      | for j ∈ 1.. NC + 1
      |   ri,j ← velcaida if celaci,j = 1
      |   ri,j ← 0 otherwise
      | r

```

$wo_{11,20} := 0$

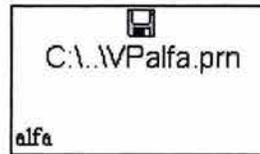
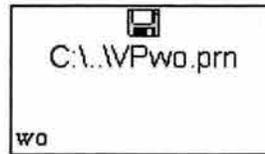
```

alfa := | for i ∈ 1.. NR
        | for j ∈ 1.. NC + 1
        |   ri,j ← difusion if celaci,j = 1
        |   ri,j ← 0 otherwise
        | r

```

$alfa_{11,20} := 0$

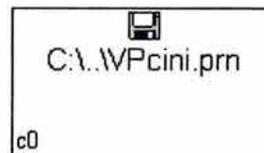
Archivos con velocidades de caída y coeficientes de difusión



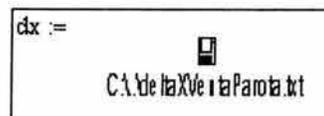
Concentracion inicial de calculo $C = 0$ (kg/m³)

```
c0 := | for i ∈ 1.. NR
      |   for j ∈ 1.. NC + 1
      |     ri,j ← 0
      | r
```

Archivo de concentracion inicial



Suma del volumen de todas las celdas de calculo



```
vol := | r ← 0
      |   for i ∈ 1.. NR
      |     for j ∈ 1.. NC
      |       r ← r + 0.25 (AMIi,j + AMDi,j + AMAi,j + AMABi,j) · dxj · 5 if celaci,j = 1
      | r
```

Volumen tota (m³):

$$\text{vol} = 5.116 \times 10^9$$

APÉNDICE F

**Programa para el cálculo de la turbidez
turbidez.cpp**

```

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <string>

using namespace std;

///// Lectura de datos /////

int main(int argc, char *argv[])
{
    if(argc!=2)
    {
        cerr << "falta archivo de datos \n";
        return 0;
    }
    ifstream dini(argv[1]);
    if(!dini)
    {
        cerr << "no se puede abrir el archivo" << argv[1] << '\n';
        return 0;
    }
    string narch[7],temp;
    for(int i =0; i < 7; ++i)
    {
        dini >> narch[i];
    }

    double dy, wo, alfa, dt, tf;
    int w, h, iot, jot;

    dini >> temp >> dy;
    dini >> temp >> wo;
    dini >> temp >> alfa;
    dini >> temp >> dt;
    dini >> temp >> tf;
    dini >> temp >> w;
    dini >> temp >> h;
    dini >> temp >> iot;
    dini >> temp >> jot;

    dini.close();

    double ama[h][w], amab[h][w], ami[h][w], amd[h][w];
    double dx[w];
    double qm[12],cen[12];
    int celac[h][w];

    ifstream dm(narch[0].c_str());

    for(int i =0; i < 12; ++i)
    {
        dm >> temp >> qm[i] >> cen[i];
    }

    dm.close();

    ifstream a1(narch[1].c_str());

```

```

ifstream a2(narch[2].c_str());
ifstream a3(narch[3].c_str());
ifstream a4(narch[4].c_str());
ifstream celdaa(narch[6].c_str());

for(int i =0; i < h; ++i)
{
    for(int j =0; j < w; ++j)
    {
        a1 >> ama[i][j];
        a2 >> amab[i][j];
        a3 >> ami[i][j];
        a4 >> amd[i][j];
        celdaa >> celac[i][j];
    }
}

a1.close();
a2.close();
a3.close();
a4.close();
celdaa.close();

ifstream dlx(narch[5].c_str());
for(int i = 0; i < w; ++i)
{
    dlx >> dx[i];
}

/*-----*/

///// Ubicación de celdas de fondo /////

int celf[h][w];

for(int i =0; i < h; ++i)
{
    for(int j =0; j < w; ++j)
    {
        if(i < h-1)
        {
            if(celac[i][j] ==1 && celac[i+1][j]==0)
                celf[i][j] = 1;
            else
                celf[i][j] = 0;
        }
        else
        {
            if(celac[i][j] ==0)
                celf[i][j] = 0;
            else
                celf[i][j] = 1;
        }
    }
}

/*-----*/

///// Cálculo de velocidades /////

```

```

double vhi[12][h][w], vhd[12][h][w], va[12][h][w], vab[12][h][w];
double ai[h][w], ad[h][w], aa[h][w], aab[h][w];

for(int i = 0; i < h; ++i)
{
    for(int j = 0; j < w; ++j)
    {
        ad[i][j] = amd[i][j]*dy;
        ai[i][j] = ami[i][j]*dy;
        aa[i][j] = ama[i][j]*dx[j];
        aab[i][j] = amab [i][j]*dx[j];
    }
}

double at[w];
int fla[h][w];
double vel;
double qhi[h][w], qhd[h][w], qva[h][w], qvab[h][w];
string nmes[]={ "enero", "febrero", "marzo", "abril", "mayo",
                "junio", "julio", "agosto", "septiembre", "octubre",
                "noviembre", "diciembre"};

for(int k =0; k < 12; ++k)
{
    at[0] = 0;

///// Cálculo de velocidad izquierda /////

    for(int i = 0; i < h; ++i)
    {
        if(celac[i][0]==1)
        {
            at[0] += ai[i][0];
            fla[i][0] = 1;
        }
        else
        {
            fla[i][0] = 0;
        }
    }
    for(int j = 1; j < w; ++j)
    {
        at[j] = 0;
        for(int i =0; i < h; ++i)
        {
            if(celac[i][j] ==1 && celac[i][j] ==celac[i][j-1])
            {
                at[j] += ai[i][j];
                fla[i][j] = 1;
            }
            else
            {
                fla[i][j] =0;
            }
        }
    }
}
for(int j =0; j < w; ++j)
{

```

```

    vel = qm[k]/at[j];
    for(int i = 0; i < h; ++i)
    {
        if(fla[i][j] == 1)
        {
            vhi[k][i][j] = vel;
        }
        else
        {
            vhi[k][i][j] = 0;
        }
    }
}

```

///// Cálculo de velocidad derecha /////

```

at[w-1] = 0;
for(int i = 0; i < h; ++i)
{
    if(celac[i][w-1]==1)
    {
        at[w-1] += ad[i][w-1];
        fla[i][w-1] = 1;
    }
    else
    {
        fla[i][w-1] = 0;
    }
}
for(int j = 0; j < w-1; ++j)
{
    at[j] = 0;
    for(int i = 0; i < h; ++i)
    {
        if(celac[i][j] == 1 && celac[i][j] == celac[i][j+1])
        {
            at[j] += ad[i][j];
            fla[i][j] = 1;
        }
        else
        {
            fla[i][j] = 0;
        }
    }
}
for(int j = 0; j < w; ++j)
{
    vel = qm[k]/at[j];
    for(int i = 0; i < h; ++i)
    {
        if(fla[i][j] == 1)
        {
            vhd[k][i][j] = vel;
        }
        else
        {
            vhd[k][i][j] = 0;
        }
    }
}
}

```

```
/*-----*/
```

```
///// Cálculo de los gastos izquierdos y derechos de las celdas /////
```

```
for(int i = 0; i < h; ++i)
{
    for(int j = 0; j < w; ++j)
    {
        qhi[i][j] = vhi[k][i][j]*ai[i][j];
        qhd[i][j] = vhd[k][i][j]*ad[i][j];
    }
    for(int j = 0; j < w; ++j)
    {
        for(int i = 0; i < h; ++i)
        {
            cout << k << ", " << i << ", " << j << '\t' << ai[i][j]<<'\n';
        }
    }
}
```

```
///// Gastos en la parte baja de las celdas /////
```

```
for(int j = 0; j < w; ++j)
{
    qvab[0][j] = qhi[0][j] - qhd[0][j];
}
for(int i = 1; i < h; ++i)
{
    for(int j = 0; j < w; ++j)
    {
        if(celac[i][j] == 1)
        {
            qvab[i][j] = qhi[i][j]-qhd[i][j]+qvab[i-1][j];
        }
        else
        {
            qvab[i][j] = 0;
        }
    }
}
```

```
///// Gastos en la parte de arriba de las celdas /////
```

```
for(int j = 0; j < w; ++j)
{
    qva[0][j] = 0;
}
for(int i = 1; i < h; ++i)
{
    for(int j = 0; j < w; ++j)
    {
        if(celac[i][j] == 1)
        {
            qva[i][j] = qvab[i-1][j];
        }
        else
        {
            qva[i][j] = 0;
        }
    }
}
```

```

    }
}

```

///// Cálculo de velocidades en la parte de arriba de las celdas /////

```

for(int i = 0; i < h; ++i)
{
    for(int j = 0; j < w; ++j)
    {
        if(celac[i][j] ==1)
        {
            va[k][i][j] = qva[i][j]/aa[i][j];
        }
        else
        {
            va[k][i][j] = 0;
        }
    }
}

```

///// Cálculo de las velocidades en la parte de abajo de las celdas /////

```

for(int i = 0; i < h; ++i)
{
    for(int j = 0; j < w; ++j)
    {
        if(celac[i][j] ==1)
        {
            vab[k][i][j] = qvab[i][j]/aab[i][j];
        }
        else
        {
            vab[k][i][j] = 0;
        }
    }
}

```

///// Se guardan cálculos de velocidades /////

```

ofstream av1(("vhi_" + nmes[k] + ".txt").c_str());
ofstream av2(("vhd_" + nmes[k] + ".txt").c_str());
ofstream av3(("va_" + nmes[k] + ".txt").c_str());
ofstream av4(("vab_" + nmes[k] + ".txt").c_str());

for(int i = 0; i < h; ++i)
{
    for(int j = 0; j < w; ++j)
    {
        av1 << vhi[k][i][j] << '\t';
        av2 << vhd[k][i][j] << '\t';
        av3 << va[k][i][j] << '\t';
        av4 << vab[k][i][j] << '\t';
    }
    av1 << '\n';
    av2 << '\n';
    av3 << '\n';
    av4 << '\n';
}
av1.close();

```

```

    av2.close();
    av3.close();
    av4.close();

///// Campo de velocidades /////

double vx, vy, xx, yy;
ofstream camvel(("vel_"+nmes[k]+".txt").c_str());

for(int i = 0; i < h; ++i)
{
    for(int j = 0; j < w; ++j)
    {
        if(celac[i][j] ==1)
        {
            vx = 0.5*(vhi[k][i][j]+vhd[k][i][j]);
            vy = -0.5*(va[k][i][j]+vab[k][i][j]);
        }
        else
        {
            vx = 0;
            vy = 0;
        }

        yy = 170.0 - 0.5*dy-i*dy;

        if(j==0)
        {
            xx = 0.5*dx[j];
        }
        else
        {
            xx =0;
            for(int m =0; m < j; ++m)
            {
                xx += dx[m];
            }
            xx += dx[j]*0.5;
        }
        camvel << xx << '\t' << yy << '\t';
        camvel << vx << '\t' << vy << '\n';
    }
}
camvel.close();

} ///// Fin de meses /////

/*-----*/

///// CÁLCULO DE LA TURBIDEZ /////

double cx[h][w], cy[h][w], cd[h][w], ca[h][w], c0[h][w], d0[h][w];
double vi[h][w], vd[h][w], var[h][w], vaba[h][w];
double cve;
int itermes[11];
int iterannual;

```

```

for(int i =0; i<12;++i)
{
    itermes[i] = 30*86400/((int)dt)*(i+1);
}
iteranual = itermes[11];
cout << "iteranual=" << iteranual << '\n';

int intercalen =((int)tf)*itermes[11];
for(int i=0; i<h;++i)
{
    for(int j=0; j<w;++j)
    {
        c0[i][j] =0;
        d0[i][j] =0;
    }
}
cout << "intercalen=" << intercalen << '\n';

int tfin= ((int)tf+1)*iteranual;
int tact;
cout << "tfin=" << tfin << '\n';

ofstream ot("ot.txt");

for(int tt=0; tt< tfin;++tt)
{
    ///// Determinacion de datos mensuales /////

    tact = tt;
    while(tact>iteranual)
    {
        tact -= iteranual;
    }
    for(int k=0; k<12;++k)
    {
        if(tact < itermes[k])
        {
            cve = cen[k];
            for(int i=0; i< h;++i)
            {
                for (int j=0; j<w; ++j)
                {
                    vi[i][j] = vhi[k][i][j];
                    vd[i][j] = vhd[k][i][j];
                    var[i][j] = va[k][i][j];
                    vaba[i][j] = vab[k][i][j];
                }
            }
            break;
        }
    }

    ///// Calculo de cx /////

    for(int i=0; i< h;++i)
    {
        if(celac[i][0] ==1)
        {

```

```

                cx[i][0] = ((cve*ami[i][0]*vi[i][0]) - (c0[i][0]*
                    amd[i][0]*vd[i][0]))*dt/(0.5*dx[0]*(ami[i][0]+
                    amd[i][0]));
            }
            else cx[i][0] = 0;
        }
    }

    for(int i=0; i < h; ++i)
    {
        for(int j=1; j<w;++j)
        {
            if(celac[i][j] ==1)
            {
                cx[i][j] = ((c0[i][j-1]*ami[i][j]*vi[i][j]) - (c0[i][j]*
                    amd[i][j]*vd[i][j]))*dt/(0.5*dx[j]*(ami[i][j]+
                    amd[i][j]));
            }
            else cx[i][j] = 0;
        }
    }

    ///// Calculo de cy /////

    for(int j=0; j< w;++j)
    {
        if((vaba[0][j] >= 0) && (celac[0][j] ==1))
        {
            cy[0][j] = (-c0[0][j]*amab[0][j]*vaba[0][j])*dt/(0.5*dy*
                (ama[0][j]+amab[0][j]));
        }
        else if(celac[0][j] ==1)
        {
            cy[0][j] = (-c0[1][j]*amab[0][j]*vaba[0][j])*dt/(0.5*dy*
                (ama[0][j]+amab[0][j]));
        }
        else
        {
            cy[0][j] = 0;
        }
    }

    for(int i= 1; i<h;++i)
    {
        for(int j=0; j<w;++j)
        {
            if((var[i][j] >=0) && (vaba[i][j]>=0) && (celac[i][j] ==1))
            {
                cy[i][j] = ((c0[i-1][j]*ama[i][j]*var[i][j]) -
                    (c0[i][j]*amab[i][j]*vaba[i][j]))*dt/
                    (0.5*dy*(ama[i][j]+amab[i][j]));
            }
            else if((var[i][j] < 0) && (vaba[i][j] < 0)&&
                (celac[i][j] ==1))
            {
                if(i < h)
                {
                    if(celac[i+1][j] ==1)
                    {
                        cy[i][j] = ((c0[i][j]*ama[i][j]*
                            var[i][j]) - (c0[i+1][j]*amab[i][j]

```



```

}
for(int i =1; i<h-1;++i)
{
    for(int j=0;j<w;++j)
    {
        if((celf[i][j] ==0) && (celac[i][j] ==1))
        {
            cd[i][j] = (c0[i-1][j]-c0[i][j])*ama[i][j]*alfa*dt/
                (0.5*dy*dy*(ama[i][j]+amab[i][j]))-
                (c0[i][j]-c0[i+1][j])*amab[i][j]*alfa*dt/
                (0.5*dy*dy*(ama[i][j]+amab[i][j]));
        }
        else if(celac[i][j] == 1)
        {
            cd[i][j] = (c0[i-1][j]-c0[i][j])*ama[i][j]*alfa*dt/
                (0.5*dy*dy*(ama[i][j]+amab[i][j]));
        }
        else
        {
            cd[i][j] =0;
        }
    }
}
cd[iot-1][jot-1]=0;

///// Calculo de ca /////

for(int j =0; j < w; ++j)
{
    if((celf[0][j]==0) && (celac[0][j]==1))
    {
        ca[0][j] = -c0[0][j]*amab[0][j]*wo*dt/(0.25*dy*(ama[0][j]
            +amab[0][j]+ami[0][j]+amd[0][j]))-
            c0[0][j]*(ama[0][j]-amab[0][j])*wo*dt/
            (0.25*dy*(ama[0][j]+amab[0][j]+ami[0][j]+
            amd[0][j]));
    }
    else if(celac[0][j] ==1)
    {
        ca[0][j] = c0[0][j]*ama[0][j]*wo*dt/(0.25*dy*(ama[0][j]
            +amab[0][j]+ami[0][j]+amd[0][j]));
    }
    if((celf[h-1][j]==1)&& (celac[h-1][j]==1))
    {
        ca[h-1][j] = c0[h-2][j]*ama[h-1][j]*wo*dt/(0.25*dy*
            (ama[h-1][j]+amab[h-1][j]+ami[h-1][j]+
            amd[h-1][j]))-
            c0[h-1][j]*ama[h-1][j]*wo*dt/
            (0.25*dy*(ama[h-1][j]+amab[h-1][j]+ami[h-1][j]+
            amd[h-1][j]));
    }
    else
    {
        ca[h-1][j] =0;
    }
}

for(int i=1; i<h-1;++i)
{

```

```

for (int j=0;j<w;++j)
{
    if((celf[i][j] ==0) && (celac[i][j]==1))
    {
        ca[i][j] = (c0[i-1][j]*ama[i][j]-c0[i][j]*amab[i][j])*
            wo*dt/(0.25*dy*(ama[i][j]+amab[i][j]+ami[i][j]+
            amd[i][j]))-
            c0[i][j]*(ama[i][j]-amab[i][j])*wo*dt/
            (0.25*dy*(ama[i][j]+amab[i][j]+ami[i][j]+
            amd[i][j]));
    }
    else if(celac[i][j]==1)
    {
        ca[i][j] = c0[i-1][j]*ama[i][j]*wo*dt/
            (0.25*dy*(ama[i][j]+amab[i][j]+ami[i][j]+
            amd[i][j]))-
            c0[i][j]*ama[i][j]*wo*dt/
            (0.25*dy*(ama[i][j]+amab[i][j]+ami[i][j]+
            amd[i][j]));
    }
    else
    {
        ca[i][j]=0;
    }
}
ca[iot-1][jot-1]=0;

```

///// Cálculo del depósito /////

```

if(tt > intercalen)
{
    for(int i=0;i<h;++i)
    {
        for(int j=0;j<w;++j)
        {
            if(celac[i][j]==1)
            {
                if(celf[i][j]==0)
                {
                    d0[i][j] += c0[i][j]*(ama[i][j]-amab[i][j])*wo
                        *dt*dx[j];
                }
                else
                {
                    d0[i][j] += c0[i][j]*ama[i][j]*wo*dt*dx[j];
                }
            }
        }
    }
}

```

///// Cálculo de concentraciones nuevas /////

```

for(int i=0; i<h; ++i)
{
    for(int j=0; j<w;++j)

```

```

    {
        if(celac[i][j])
        {
            c0[i][j] = c0[i][j]+cx[i][j]+cy[i][j]+ca[i][j]+
                cd[i][j];
            if(c0[i][j]<0)
            {
                c0[i][j] =0;
            }
        }
    }
}

```

///// Almacenamiento de datos /////

```

if(tt>itercalen)
{
    int mes=-1;
    for(int i=0; i<12;++i)
    {
        if(itermes[i]-1==tact)
        {
            mes=i;
            break;
        }
    }
    if(mes >= 0)
    {
        ofstream salC(("C"+nmes[mes]+".res").c_str());
        ofstream salD(("D"+nmes[mes]+".res").c_str());
        for(int i=0;i<h;++i)
        {
            for(int j=0; j<w;++j)
            {
                salC << c0[i][j] << '\t';
                salD << d0[i][j] << '\t';
                d0[i][j]=0;
            }
            salC << '\n';
            salD << '\n';
        }
        salC.close();
        salD.close();
        ot << mes+1 << '\t' << c0[iot-1][jot-1] << '\n';
        cout << "-" << '\n';
    }
}
if(tt%iteranual==0)
{
    cout << "." << '\n';
}

```

```

} ///// Fin de iteraciones /////
ot.close();

```

```

return 0;

```

```

}

```