



Proyecto del Tercer Juego de Esclusas

Traducción

Nombre del estudio en inglés: Saltwater intrusion analysis for Post Panamax Locks - Effect of water recycling at Pacific side of Canal and alternative methods to mitigate salt water intrusion

Nombre del estudio en español: Análisis de la intromisión de agua salada en esclusas Pospanamax - Efecto del reciclaje de agua en las esclusas Pospanamax en el lado Pacífico del Canal y métodos alternativos para mitigar la intromisión de agua salada

Fecha del informe final: Abril de 2004

Fecha de la traducción: 24 de mayo de 2006

Nombre del consultor: WL Delft Hydraulics

RESUMEN EJECUTIVO



Contenido del resumen ejecutivo

1. Introducción.....	1-1
2. Efecto del reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal.....	2-1
2.1 Antecedentes y propósito del estudio.....	2-1
2.2 Modelo de simulación de la intromisión de agua salada.....	2-2
2.3 Intercambio de agua salada entre la antecámara de las esclusas y el lago.....	2-6
2.4 Escenarios de control de agua en el lago Gatún.....	2-8
2.5 Efecto del reciclaje de agua en los niveles de concentración de sal.....	2-14
2.6 Conclusiones del reciclaje de agua.....	2-23
3. Medidas de mitigación de la intromisión de agua salada.....	3-1
3.1 Proceso de la intromisión de agua salada.....	3-1
3.2 Medidas de mitigación.....	3-1
3.3. Conclusiones de las medidas de mitigación y recomendaciones.....	3-7



1. Introducción

La Autoridad del Canal de Panamá (ACP) está desarrollando un plan maestro a largo plazo para incrementar la capacidad del Canal de Panamá y su capacidad de tránsito de buques. Con ese fin, la ACP ha iniciado un estudio para evaluar la factibilidad de construir instalaciones y equipos auxiliares para proporcionar fuentes adicionales de suministro de agua y la generación de la energía hidroeléctrica asociada, nuevos juegos de esclusas, sistemas alternos para elevar y bajar los buques, mejoras al canal de navegación y a la infraestructura marítima. El estudio ha sido diseñado para ayudar al Canal a satisfacer la futura demanda de tráfico y las necesidades de servicio de sus clientes, a la vez que continúe ofreciendo un servicio eficiente y competitivo durante los próximos cincuenta años y más allá.

La División de Proyectos de Capacidad del Canal ha analizado las fuentes de agua disponibles para las operaciones del Canal, al igual que varios nuevos proyectos de suministro de agua que poseen el potencial para suministrar el agua necesaria para satisfacer tanto las demandas a largo plazo de las operaciones del Canal (lo que incluye las nuevas esclusas) como el aumento de la demanda de agua municipal e industrial que se han identificado. La División de Proyectos de Capacidad del Canal posteriormente dio inicio al desarrollo conceptual de las nuevas esclusas por las que transitarán los buques Pospanamax. El tamaño tentativo de las esclusas Pospanamax propuestas es de 61 metros de ancho por 457 metros de largo y 18.3 metros de profundidad, dimensiones significativamente más grandes que las de las esclusas actuales de tamaño Panamax que miden 33.5 metros de ancho por 305 metros de largo y 13 metros de profundidad.

Las esclusas Pospanamax propuestas pueden tener varias configuraciones de diseño, que van desde un sistema de esclusas de un solo nivel hasta un sistema de tres niveles. Se espera que la nueva configuración de las esclusas y el número de niveles efectúen la transferencia de agua salada a través del sistema de esclusas al lago Gatún y al lago Miraflores, y que las nuevas esclusas requieran una mayor cantidad de agua dulce para las operaciones del Canal. En vista de lo anteriormente expuesto, se ha considerado el uso de tinajas laterales de reutilización de agua.

El problema de la posible intromisión de agua salada al lago Gatún como resultado de la operación de las esclusas existentes y de las esclusas Pospanamax propuestas es un tema de preocupación ambiental de suma importancia, el cual jugará un papel preponderante en la evaluación de la propuesta de las esclusas Pospanamax. Para realizar la evaluación se requiere un conocimiento profundo de la intromisión de agua salada a través de las operaciones de las esclusas y del uso de tinajas de reutilización de agua. Se necesitan nuevas herramientas para llevar a cabo un análisis de los procesos físicos y operacionales implicados.

La Autoridad del Canal de Panamá (ACP) le adjudicó a WL | Delft Hydraulics el contrato para el “Análisis de la intromisión de agua salada en las esclusas del Canal de Panamá, sistema de reciclaje de agua de las esclusas Pospanamax” (Contrato No. SAA-110830, fechado 3 de junio de 2003, con prórroga hasta febrero del 2004).

El objetivo de esta consultoría es el de brindar a la ACP servicios en lo concerniente a la intromisión de agua salada a través de las esclusas del Canal de Panamá. Los servicios se enfocan en la situación futura con una tercera vía y esclusas Pospanamax e incluyen:

- Análisis de los efectos del reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal en los niveles de concentración de sal en el lago Gatún y en el lago Miraflores



- Identificación de métodos alternos para mitigar la intromisión de agua salada a través de las esclusas del Canal de Panamá.

El estudio relativo al reciclaje de agua se presenta en la Parte I de este Informe E, y el estudio sobre las medidas de mitigación se encuentra en la Parte II. Estas dos partes se pueden leer independientemente. Los estudios se llevaron a cabo en el período comprendido entre septiembre del 2003 y febrero del 2004. Esta parte del informe presenta una reseña de los estudios y un resumen de los principales hallazgos, conclusiones y recomendaciones.

A lo largo del informe se hace referencia a informes previos de esta serie sobre la intromisión de agua salada:

- Informe A de junio del 2003 (Proyecto No. Q3039 de WL | Delft Hydraulics): presenta los resultados del análisis de la intromisión de agua salada en la situación existente.
- Informes B, C y D de septiembre de 2003 (Proyecto No. Q3039 de WL | Delft Hydraulics): presentan los resultados del análisis de la intromisión de agua salada en la situación futura con una tercera vía y esclusas Pospanamax de 3 niveles, 2 niveles y un solo nivel.



2. Efecto del reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal

2.1 Antecedentes y propósito del estudio

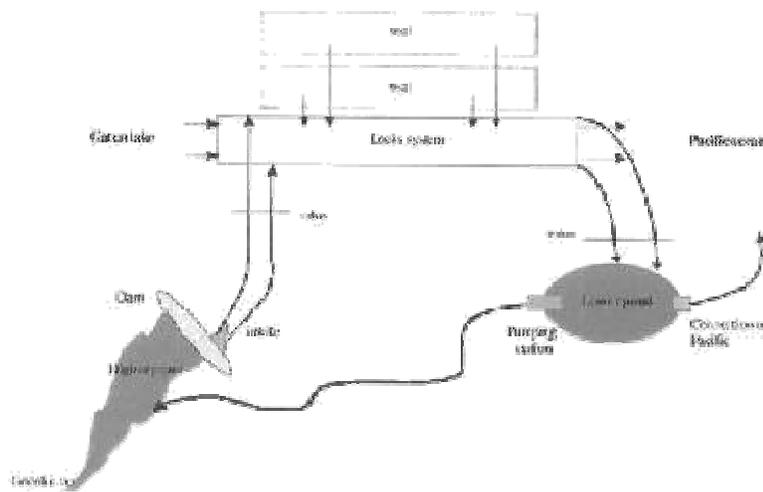
La ACP está considerando la instalación de un sistema de reciclaje de agua en las esclusas Pospanamax en el lado Pacífico del Canal. El objetivo de este sistema es compensar la pérdida de agua resultante de las operaciones de las esclusas con una tercera vía, y utilizarla en los períodos secos, en los que prevalece la escasez de agua dulce. De esta forma, el reciclaje de agua pudiese ser una alternativa para el suministro de agua dulce al lago Gatún proveniente de nuevas fuentes de agua. No obstante, el sistema pudiese ocasionar a la vez una carga extra de agua salada al lago Gatún e, indirectamente, al lago Miraflores.

La ACP ha considerado tres opciones de reciclaje de agua (véase también la Ilustración 2.2 en la Parte I):

Opción 1: El agua es directamente reciclada de la poscámara a la antecámara de la esclusa sin utilizar las lagunas de almacenamiento. Una estación de bombas de desagüe contigua a la poscámara de la esclusa retorna continuamente el agua a la antecámara de la esclusa.

Opción 2: La esclusa inferior vierte a una laguna de almacenamiento inferior. La estación de bombas de desagüe retorna continuamente el agua de la laguna inferior a la antecámara de la esclusa.

Opción 3: La esclusa inferior vierte a una laguna de almacenamiento inferior, y la esclusa superior extrae agua de una laguna de almacenamiento superior. La estación de bombas de desagüe retorna continuamente el agua de una laguna inferior a una laguna superior.



Opción 3 de reciclaje: reciclaje de laguna a laguna (fuente: Consorcio Pospanamax)

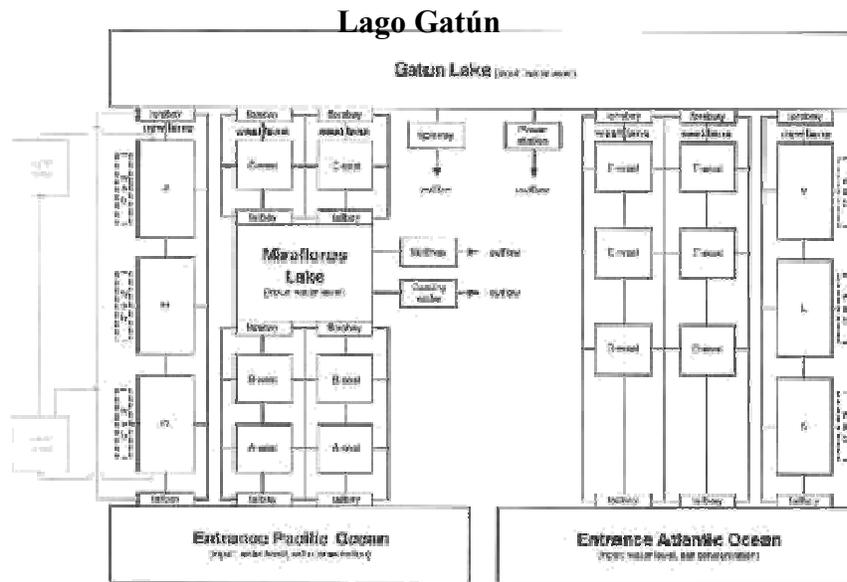


Se estudian los efectos del reciclaje de agua en los niveles de concentración de sal en el lago Gatún y en el lago Miraflores en el caso de las esclusas Pospanamax de tres niveles (las tres opciones), esclusas Pospanamax de dos niveles (opción 3) y esclusas Pospanamax de un solo nivel (opción 3). Únicamente se considera el reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal durante los períodos secos cuando no hay suministro de agua dulce y el nivel de agua del lago Gatún desciende por debajo del nivel mínimo requerido para la navegación. Se estudian diferentes escenarios para el control del nivel de agua del lago Gatún. Los elementos principales de estos escenarios son: el posible uso de tinas de reutilización de agua conectadas a las esclusas Pospanamax y una reducción en las cantidades de agua que se vierten a la represa de Gatún y/o se utilizan para la generación de energía hidroeléctrica.

2.2 Modelo de simulación de la intromisión de agua salada

El proceso de intromisión de sal a través de las esclusas del Canal de Panamá se simula con un modelo numérico. Este modelo se estableció para la situación actual (véase Informe A, emitido en junio del 2003) y se ha extendido y adaptado a la situación con una nueva vía y esclusas Pospanamax. Se modelaron tres configuraciones de esclusas Pospanamax: sistemas de tres niveles, dos niveles y un solo nivel. Estos sistemas de esclusas están dotados de tinas de reutilización de agua (wsb, por sus siglas en inglés), las cuales pueden ser puestas en operación o desconectadas (véanse los Informes B, C y D, emitidos en septiembre del 2003). El modelo predice la carga de agua salada en el lago Gatún y en el lago Miraflores ocasionada por las operaciones de las esclusas, y toma en consideración las fluctuaciones del nivel de agua de los lagos, las descargas de agua a la represa de Gatún y a la represa de Miraflores, y las variaciones de la marea y las variaciones en la concentración de sal en las poscámaras de las esclusas que dan al mar.

En el marco de este estudio se ha extendido el modelo de simulación con un sistema de reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal. Las opciones de reciclaje 1, 2 y 3 antes mencionadas han sido modeladas para una configuración de esclusas Pospanamax de 3 niveles (véase la línea roja en el esquema a continuación). La opción 3 fue modelada para las configuraciones con 2 niveles y un solo nivel. Cuando se activan las opciones de reciclaje de agua en el modelo de simulación, las acciones de reciclaje se ejecutan cada vez que un buque pasa por las esclusas Pospanamax en el lado Pacífico del Canal. La cantidad de agua que se recicla es igual a la cantidad de agua que de otra forma se vertería a la poscámara de la esclusa cuando el sistema de reciclaje no está activo. Cuando las esclusas están provistas de tinas de reutilización de agua, se recicla una menor cantidad de agua. Al igual, la cantidad de agua que se pierde como resultado de una operación de cambio de dirección es reciclada en el momento que se ejecuta la operación de esclusaje de cambio de dirección. De esta manera, la cantidad total de agua reciclada compensa el total de agua que se pierde como resultado de las operaciones de las esclusas, similar al prediseño del sistema de reciclaje del Consorcio Pospanamax (CPP).



Three water recycling options for 3-level lock configuration in simulation model

Tres opciones de reciclaje de agua para la configuración de esclusas de 3 niveles en el modelo de simulación

En el modelo de simulación se definen los movimientos de buques entre el Océano Pacífico o el Océano Atlántico y el lago Gatún, y en sentido inverso. Estos movimientos de buque se simulan en una serie de acciones posteriores; en las que el reciclaje de agua es la última acción. En el proceso de esclusaje se pueden distinguir tres pasos básicos:

- Paso I: se equilibran los niveles de agua de dos cámaras adyacentes; se transfiere el agua de la cámara superior a la cámara inferior, si las tinas de reutilización de agua pertinentes de la cámara superior (cámara de la esclusa) están llenas y las tinas de reutilización de agua de la cámara inferior (cámara de la esclusa) están vacías.
- Paso II: se abren las compuertas de las esclusas y el buque pasa de una tina a la adyacente; una cantidad neta de agua igual al volumen del buque se desplaza en la dirección inversa permitiendo los flujos de densidad.
- Paso III: se recicla el agua que se utiliza en la operación de las esclusas en el lado Pacífico del Canal.

Los dos primeros pasos se repiten cada vez que un buque pasa de una cámara a la otra; el último paso se ejecuta al concluir por completo las operaciones de esclusajes ascendentes o descendentes en el lado Pacífico del Canal (o después de que se haya realizado una operación de esclusaje de cambio de dirección).

Se han utilizado una serie de ecuaciones de conservación de la masa para describir y cuantificar tanto la transferencia de agua como la de sal entre las dos cámaras adyacentes y, de ser pertinente, entre estas tinas (cámaras de las esclusas) y las tinas de reutilización de agua correspondientes. Los coeficientes de intercambio de sal e_x se aplican en las ecuaciones de balance de sal en combinación con un volumen de referencia V_{ref} . En el paso I, el volumen de referencia V_{ref} es

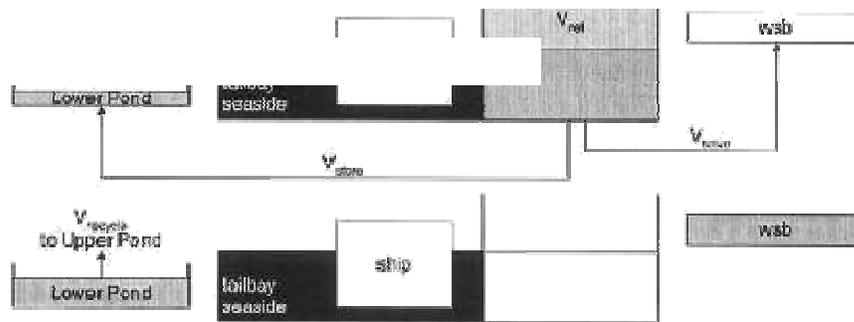


igual a la cantidad de agua que se transfiere de la cámara superior a la cámara inferior para equilibrar los niveles de agua de las dos cámaras. En el caso de las tinas de reutilización de agua, una parte del V_{save} del volumen V_{ref} se suministra o se retira de las tinas de reutilización de agua de las respectivas cámaras de las esclusas. En el paso II, el volumen de referencia V_{ref} es igual a la cantidad de agua en la cámara superior. El volumen S sumergido del buque tiene un papel aquí. En el paso III, la cantidad de $V_{recycle}$ representa la cantidad de agua que se recicla de la poscámara a la antecámara de la esclusa (reciclaje directo, opción 1), de la laguna de almacenamiento inferior a la antecámara de la esclusa (opción 2) o de la laguna de almacenamiento inferior a la laguna de almacenamiento superior (opción 3). Todos los productos e_x , V_{ref} , c (c = concentración de sal), e_x , V_{save} , c , e_x , $S.c.$ y e_x , $V_{recycle}$, c representan una cierta cantidad de sal en el balance de sal.

Las ecuaciones de balance de agua y balance de sal han sido analizadas extensivamente en los informes anteriores (para la situación actual, véase el Informe A, y para la situación futura con las esclusas Pospanamax véanse los Informes B, C y D).

Como ejemplo, presentamos aquí las ecuaciones que describen el balance de sal en el paso I del proceso de esclusaje ascendente, en el caso en que se aplican las tinas de reutilización de agua y las lagunas de almacenamiento (opción 3). Se presentan ecuaciones tanto para la esclusa inferior como para la esclusa superior. También se presentan las ecuaciones del balance de sal del paso III, en el caso en que se recicla el agua de la laguna de almacenamiento inferior a la laguna de almacenamiento superior. Las ecuaciones que se utilizan en el paso II no se ven afectadas por el reciclaje de agua; y las mismas se incluyen en los Informes A, B, C y D.

Paso I, poscámara de la esclusa → esclusa inferior, opción 3 de reciclaje de agua



Ecuaciones de balance de sal:

$$c_{high} = \frac{(V_{high} \cdot c_{high}) - (c_{wslb} \cdot V_{save} + c_{high}) - (c_{wslb} \cdot V_{save} + c_{high}) - (c_x \cdot (V_{ref} - V_{save} - V_{save}) \cdot c_{high})}{V_{high}}$$

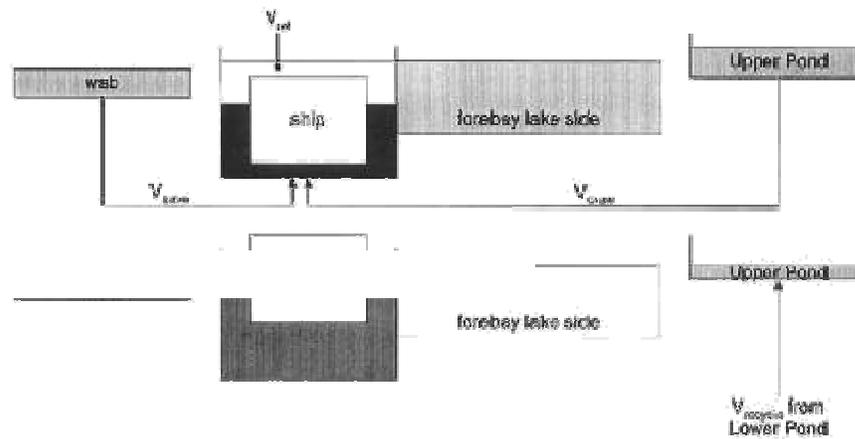
$$c_{wslbhigh} = \frac{(V_{wslbhigh} \cdot c_{wslbhigh}) + (c_{wslbl} \cdot V_{save} + c_{high})}{V_{wslbhigh}}$$

$$c_{low} = \frac{(V_{low} \cdot c_{low}) + (c_{low} \cdot V_{save} + c_{high})}{V_{low}}$$



Nota: el índice inferior *high* se refiere a la cámara superior de dos cámaras adyacentes, el índice inferior *low* se refiere a la cámara inferior, el índice inferior *wsbhigh* se refiere a las tinajas de reutilización de agua de la cámara superior, el índice inferior *wsblow* se refiere a las tinajas de reutilización de agua de la cámara inferior, el índice inferior *LP* se refiere a la laguna de almacenamiento inferior del sistema de reciclaje, el índice inferior *UP* se refiere a la laguna de almacenamiento superior, el índice inferior *1* se refiere al principio del paso, y el índice inferior *2* se refiere al final del paso.

Paso 1, esclusa superior → antecámara de la esclusa, opción 3 de reciclaje de agua



Ecuaciones de balance de sal:

$$c_{low2} = \frac{(V_{inf1} \cdot c_{inf1}) + (V_{wsbdraw1} \cdot V_{sane} \cdot c_{wsbhigh1}) + (c_{UPrecycle1} \cdot V_{draw} \cdot c_{UP1}) + (c_s \cdot (V_{inf} - V_{sane} - V_{draw}) \cdot c_{high1})}{V_{low2}}$$

$$c_{high2} = \frac{(V_{inf1} \cdot c_{inf1}) - (c_s \cdot (V_{inf} - V_{sane} - V_{draw}) \cdot c_{high1}) + ((V_{inf} - V_{sane} - V_{draw}) \cdot c_{lake1})}{V_{high2}} = c_{lake2}$$

$$c_{lake2} = (V_{wsblow1} \cdot c_{wsblow1}) - (c_{wsbempty} \cdot V_{sane} \cdot c_{wsblow1})$$

$$c_{lake2} = c_{lake1} - \frac{(V_{inf} - V_{sane} - V_{draw})}{V_{lake}} \cdot c_{lake1}$$

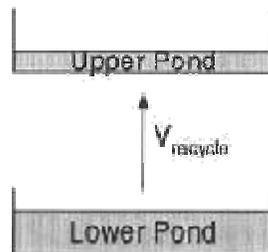
$$c_{UP2} = \frac{(V_{UP1} \cdot c_{UP1}) - (c_{UPempty} \cdot V_{draw} \cdot c_{UP1})}{V_{UP2}}$$



Ecuaciones similares son válidas para el paso 1 del proceso de esclusaje descendiente.

Los coeficientes de intercambio que se utilizaron en el paso 1 son siempre positivos o cero, lo que significa que la transferencia de agua a través del sistema de llenado y vaciado de agua de una cámara a la otra no permite la transferencia de sal en la dirección opuesta. Los coeficientes de intercambio e_x , $e_{wsbfill}$ y e_{LPfill} pueden ser mayores que 1; esto indica que la porción de agua que se transfiere de una cámara a la otra tiene una mayor concentración de sal que el agua en la cámara de donde se extrae. Por ejemplo, el agua que se extrae de una cámara superior de las esclusas y que se vierte a una tina de reutilización de agua y cámara inferior de las esclusas tiene, por lo general, una mayor concentración de sal que el agua inicial en la cámara superior de la esclusa (volumen promediado). Esto, dado que el agua proviene de la masa de agua cerca del piso con una concentración de sal más alta que el promedio. Los coeficientes de intercambio e_x , $e_{wsbfill}$ y e_{LPfill} , son seleccionados sobre la base de las medidas in situ, los resultados de los cómputos Delft3D y las consideraciones relativas a los valores límite superiores e inferiores (véanse los Informes A, B, C, D y E de la Parte I para explicaciones adicionales). En este estudio, los coeficientes de intercambio $e_{wsbempty}$ y $e_{UPempty}$ se han fijado siempre en 1. Presumimos que el agua en las tinas de reutilización de agua y en la laguna superior se mezcla totalmente durante el llenado; el agua que posteriormente se saca tiene entonces una concentración de sal igual a la del agua en las tinas de reutilización de agua y en la laguna superior antes de su extracción.

Paso III, laguna inferior de almacenamiento → laguna superior de almacenamiento, opción 3 de reciclaje de agua



Ecuaciones de balance de sal:

$$e_{LP2} = \frac{(V_{LP1} \cdot c_{LP1}) - (e_{LPUP} \cdot V_{recicla} \cdot c_{LP1})}{V_{LP2}}$$

$$e_{UP2} = \frac{(V_{UP1} \cdot c_{UP1}) + (e_{LPUP} \cdot V_{recicla} \cdot c_{LP1})}{V_{UP2}}$$

Para la transferencia por bombeo de agua de la laguna inferior de almacenamiento a la laguna superior de almacenamiento, hemos seleccionado el valor 1 para el coeficiente de intercambio e_{LP-UP} . Esta selección supone que el agua en la laguna inferior de almacenamiento se mezcla



totalmente durante el llenado y, por consiguiente, tiene una densidad y concentración de sal uniformes.

El paso III se ejecuta al final de las operaciones de los esclusajes ascendentes y descendentes y posterior a un esclusaje de cambio de dirección. Este último solamente es necesario después de un cambio de un buque rumbo norte a un buque rumbo sur, ya que esta operación ocasiona una pérdida de agua en la poscámara de la esclusa.

2.3 Intercambio de agua salada entre la antecámara de la esclusa y el lago

Puesto que el modelo de simulación utiliza los volúmenes de agua y el volumen-promedio de las concentraciones de sal en las diferentes cámaras como cantidades base, se tiene que prestar especial atención al intercambio de agua salada entre las cámaras de las esclusas y el lago. En la situación real, el agua salada penetra en el lago cuando las compuertas de las esclusas se abren para permitir la entrada o salida de un buque de la cámara de la esclusa. La intromisión de esta agua salada, por lo general, consiste en una lengua de sal que se propaga sobre el fondo. La velocidad de propagación depende de la diferencia actual de densidad; la velocidad de propagación en las antecámaras y las poscámaras de las esclusas del lago Miraflores puede ser de hasta 0.3m/s, y en las antecámaras de las esclusas del lago Gatún puede ser de hasta 0.1 – 0.2 m/s. Después de un tiempo, casi toda el agua salada ha penetrado en el lago. Sin embargo, por lo general, cierta cantidad de agua salada permanecerá en las proximidades de las esclusas para cuando arribe el siguiente buque. Por consiguiente, cuando, como parte de las operaciones de esclusaje el nivel del agua de la cámara de la esclusa se equilibra con el nivel del agua de la antecámara de la esclusa, cierta cantidad de agua salada puede fluir hacia atrás. Al igual, si hay agua salada en las cercanías de las esclusas cuando se abren las compuertas para que un buque pase de la cámara de la esclusa al lago, o al sentido inverso, esto puede tener cierto efecto en los flujos de intercambio y los flujos de densidad. Debido a esto, se requiere que el modelo de simulación tenga la capacidad de mantener temporalmente cerca de las esclusas el agua salada que ha penetrado. Esto se logra mediante el diseño de antecámaras y poscámaras separadas entre las cámaras de las esclusas y los lagos. Inicialmente, el intercambio de agua salada es entre las cámaras de las esclusas y las antecámaras o poscámaras de las esclusas; posteriormente el agua salada se mezcla con el agua del lago. Para el intercambio de agua salada, se aplica al modelo de simulación una función lineal de tiempo. Después de un período de 0.5 de hora (lago Miraflores) o 1 hora (lago Gatún), el agua salada se mezcla totalmente y la concentración en la antecámara o la poscámara de la esclusa es ahora igual a la concentración de sal en el lago. El intercambio de agua salada con agua del lago se lleva a cabo en el momento que el siguiente buque se aproxima a la antecámara o la poscámara de la esclusa proveniente del lago o, en caso de que el próximo buque esté en la cámara de la esclusa, antes de la remoción del agua de la antecámara de la esclusa o del derrame de agua a la poscámara de la esclusa.

Las ecuaciones de balance de sal para el intercambio de agua salada entre la antecámara de la esclusa y el lago son las siguientes:



$$c_{\text{forebay}2} = c_{\text{forebay}1} - e_x \cdot (c_{\text{forebay}1} - c_{\text{lake}1})$$

$$c_{\text{lake}2} = c_{\text{lake}1} + e_x \cdot (c_{\text{forebay}1} - c_{\text{lake}1}) \cdot \frac{V_{\text{forebay}}}{V_{\text{lake}}}$$

Se aplican ecuaciones similares entre la poscámara de la esclusa y el lago (esclusas de Pedro Miguel).

Se aplica una función lineal de tiempo al coeficiente de intercambio para modelar el intercambio de agua salada dependiente del tiempo.

$$e_x = \frac{\Delta t}{T} \cdot e_{x\text{full}}$$

con:

e_x = coeficiente de intercambio utilizado en la simulación (-)

$e_{x\text{full}}$ = 1 (intercambio completo de sal)

Δt = diferencias de tiempo entre dos tránsitos de buques consecutivos o entre un tránsito de un buque y un tránsito de vuelta

T = tiempos de intercambio

Si $\Delta t/T > 1$ entonces $\Delta t/T = T$, y $e_x = e_{x\text{full}} = 1$.

Se selecciona un período $T = 3600$ s para las antecámaras de las esclusas en el lago Gatún, y $T = 1800$ s para las antecámaras y poscámaras de las esclusas en el lago Miraflores. Si $\Delta t/T < 1$, una porción del agua salada se encuentra todavía en la poscámara de la esclusa al momento que arriba el siguiente buque, lo que contribuye a las ecuaciones de balance de sal.

Cuando se ha instalado un sistema de reciclaje de agua, el agua que se pierde debido a la operación de las esclusas Pospanamax en el lado Pacífico del Canal es directamente bombeada de la poscámara a la antecámara de la esclusa, bombeada de la laguna inferior a la antecámara de la esclusa, o bombeada de la laguna inferior a la laguna superior. En especial, cuando el agua se bombea a la antecámara de la esclusa, se eleva la concentración de sal cerca de las esclusas. Para determinar los coeficientes de intercambio de sal relacionados a las operaciones entre la poscámara de la esclusa y la esclusa superior (nivelación de agua, entrando o saliendo un buque), es importante saber cómo se afecta la concentración de sal en la antecámara de la esclusa durante el reciclaje de agua. En otras palabras, cuando el agua salada es directa o indirectamente (mediante la operación de la laguna inferior) bombeada a la poscámara de la esclusa, tenemos que saber qué porción permanece cerca de las esclusas y contribuye al intercambio de agua salada entre la poscámara de la esclusa y la cámara superior (una porción del agua salada puede fluir de vuelta a la cámara superior durante la nivelación o durante el movimiento de un buque).

Se han hecho los cálculos Delft3D para evaluar el efecto del reciclaje sobre los niveles de concentración de sal en la antecámara de la esclusa. De estos cálculos se desprende que, en



promedio, la concentración de sal en la antecámara de la esclusa es más alta. En las simulaciones Swinlocks, se puede obtener el efecto del reciclaje cuando el coeficiente de intercambio e_{xfull} en:

$$e_x \approx \frac{\Delta t}{T} \cdot e_{xfull}$$

se establece alrededor de 0.9. Esta selección implica que en las simulaciones Swinlocks el agua en la antecámara de la esclusa siempre tiene un nivel de concentración de sal un poco más alto que el agua del lago, como se requiere. La transferencia de sal de la antecámara de la esclusa al lago Gatún es un poco lenta, en comparación al valor e_{xfull} que normalmente se aplica en las simulaciones, pero la concentración final de sal en el lago no es afectada (con la excepción del hecho de que un poco más de agua salada es descargada durante las operaciones de esclusaje).

2.4 Escenarios de control de agua en el lago Gatún

Puesto que la nueva vía de las esclusas Pospanamax ocasiona la utilización de agua adicionales, se cambiaría el balance de agua del lago Gatún, lo que significa que se tendría que suministrar una cantidad adicional de agua al lago Gatún proveniente de nuevas fuentes de agua y / o que se descargue una menor cantidad de agua a la represa de Gatún, a fin de mantener el nivel de agua del lago Gatún. Como una alternativa, se puede reciclar el agua que se pierde a causa de las operaciones de las esclusas en la nueva vía en el lado Pacífico del Canal. Esta opción sólo se considera durante los períodos secos, cuando hay escasez de agua dulce. Las tinas de reutilización de agua de las esclusas Pospanamax ayudan a reducir la utilización de agua.

La ACP ha considerado diferentes escenarios para el control del nivel de agua del lago Gatún. En la tabla que aparece a continuación se presenta una reseña de los escenarios.

En el *baseline scenario* o escenario base (escenario 1) todo el uso de agua del lago Gatún ocasionada por la operación de las nuevas esclusas Pospanamax (las nuevas esclusas están provistas de tinas de reutilización de agua) se compensa mediante el suministro de agua dulce proveniente de nuevas fuentes de agua. El escenario 2 es igual al escenario 1, excepto que en el escenario 2 las esclusas Pospanamax no tienen tinas de reutilización de agua.

En el escenario 3 (esclusas con tinas de reutilización de agua) y el escenario 4 (esclusas sin tinas de reutilización de agua), el uso adicional de agua a causa de las operaciones de las nuevas esclusas es parcial o totalmente compensada por una menor descarga de agua en la represa Gatún; la porción restante, de haberla, se le suministra al lago Gatún proveniente de nuevas fuentes de agua.

En los escenarios 5, 7 y 9 (esclusas con tinas de reutilización de agua) y los escenarios 6, 8 y 10 (esclusas sin tinas de reutilización de agua) el uso adicional de agua a causa de las operaciones de las nuevas esclusas se compensa mediante una menor descarga de agua en la represa de Gatún; de no ser esto suficiente, en los períodos secos, se recicla el agua que se pierde como resultado de la operación de las nuevas esclusas en el lado Pacífico del Canal. En el evento de que eso todavía no sea suficiente, la porción remanente se le suministra al lago Gatún de nuevas fuentes de agua.



En este estudio se aplican los escenarios del 5 al 10. Los escenarios del 7 al 10, con el reciclaje de una laguna inferior a la antecámara de las esclusas en el lago Gatún o con reciclaje directo de la poscámara a la antecámara de la esclusa, solamente se aplican en combinación con la configuración de esclusas Pospanamax de 3 niveles. No se ha estudiado un escenario de esclusas con un solo nivel y sin tinas de reutilización de agua ya que la ACP ha descartado esta opción.

<i>Escenario</i>	<i>Descripción</i>	<i>Esclusas de 3 niveles</i>	<i>Esclusas de 2 niveles</i>	<i>Esclusas de 1 nivel</i>
1 escenario base	Tinas de reutilización de agua <i>Sin</i> reducción de las descargas de agua a la represa Gatún Suministro de agua dulce adicional al lago Gatún	B1	C1	D1
2	<i>Sin</i> tinas de reutilización de agua <i>Sin</i> reducción de las descargas de agua a la represa Gatún Suministro de agua dulce adicional al lago Gatún	B2	C2	D2
3	Tinas de reutilización de agua Se <i>reducen</i> las descargas de agua a la represa Gatún De ser necesario, suministro de agua dulce adicional al lago Gatún	B3	C3	D3
4	<i>Sin</i> tinas de reutilización de agua Se <i>reducen</i> las descargas de agua a la represa Gatún De ser necesario, suministro de agua dulce adicional al lago Gatún	B4	C4	D4
5	Tinas de reutilización de agua Se <i>reducen</i> las descargas de agua a la represa Gatún De ser necesario, reciclaje de agua; laguna inferior > laguna superior De ser necesario, suministro de agua dulce adicional al lago Gatún	B5	C5	D5
6	<i>Sin</i> tinas de reutilización de agua Se <i>reducen</i> las descargas de agua a la represa Gatún De ser necesario, reciclaje de agua; laguna inferior > laguna superior De ser necesario, suministro de agua dulce adicional al lago Gatún	B6	C6	
7	Tinas de reutilización de agua Se <i>reducen</i> las descargas de agua a la represa Gatún De ser necesario, reciclaje de agua; laguna inferior > lago Gatún De ser necesario, suministro adicional de agua dulce al lago Gatún	B7		
8	<i>Sin</i> tinas de reutilización de agua Se <i>reducen</i> las descargas de agua a la represa Gatún De ser necesario, reciclaje de agua; laguna inferior >	B8		



	lago Gatún De ser necesario, suministro de agua dulce adicional al lago Gatún			
9	Tinas de reutilización de agua <i>Se reducen</i> las descargas de agua a la represa Gatún De ser necesario, reciclaje de agua; poscámara de la esclusa > lago Gatún De ser necesario, suministro de agua dulce adicional al lago Gatún	B9		
10	<i>Sin</i> tinas de reutilización de agua <i>Se reducen</i> las descargas de agua a la represa Gatún De ser necesario, reciclaje de agua; poscámara de la esclusa > lago Gatún De ser necesario, suministro de agua dulce adicional al lago Gatún	B10		

Se han estudiado los efectos del reciclaje de agua en los niveles de concentración de sal del lago Gatún y el lago Miraflores para las intensidades de tráfico de 1, 5, 10 y 15 buques Pospanamax al día en la nueva vía. Se mantuvieron las intensidades actuales de tráfico en las dos vías existentes (36 tránsitos al día en ambas vías) en las simulaciones de intromisión de sal. Se anticipa una intensidad de tráfico de 15 buques Pospanamax al día para el año 50 después de la apertura de la nueva vía. Se realizó la comparación mutua de los resultados de diferentes escenarios por un período de 50 años.

Las cantidades de agua que se pierden debido a las operaciones de las esclusas, que se vierten en la represa de Gatún, que se suministran de fuentes de agua dulce y que se reciclan en el lado Pacífico del Canal dependen del número de tránsitos de buques en la nueva vía, aunque también dependen de las variaciones estacionales de la precipitación, las cuales se reflejan en los niveles de agua de los lagos y en las cantidades de las descargas de agua.

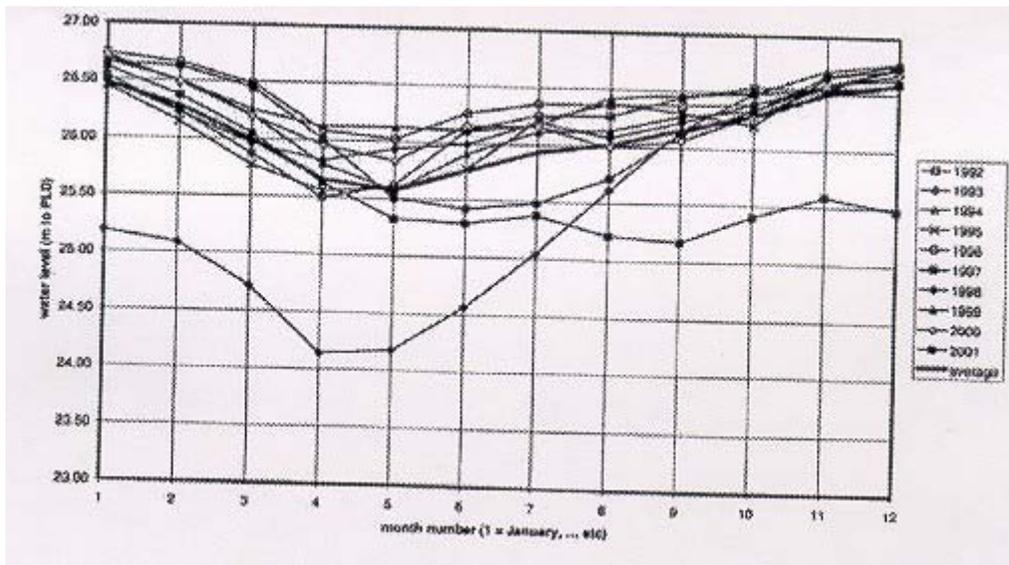
En este estudio inicialmente trabajamos con un promedio de los promedios mensuales de los niveles de agua y de las cantidades de las descargas de agua (estos se han promediado para un período de 10 años; se utilizó la información del período comprendido entre 1992 y 2001, véase la ilustración a continuación). Se eliminaron los extremos en este período (el año seco de El Niño en 1997 y el año muy lluvioso de 1999), lo cual es un requisito cuando se hacen predicciones a largo plazo de las concentraciones de sal. A fin de adquirir un buen conocimiento de los efectos de los extremos en las condiciones hidráulicas, hicimos otra simulación sobre la base de las variaciones estacionales actuales en el período entre 1992 y 2001 (promedios mensuales).

Las ilustraciones a continuación presentan los promedios mensuales del nivel de agua del lago Gatún y las descargas de agua a la represa de Gatún durante el período entre 1992 y 2001, y los valores promedio de los promedios mensuales. Estos valores promedio se utilizaron inicialmente en las simulaciones de la intromisión de agua salada.

Información similar sobre las variaciones estacionales del nivel de agua del lago Miraflores ha sido utilizada en las simulaciones.

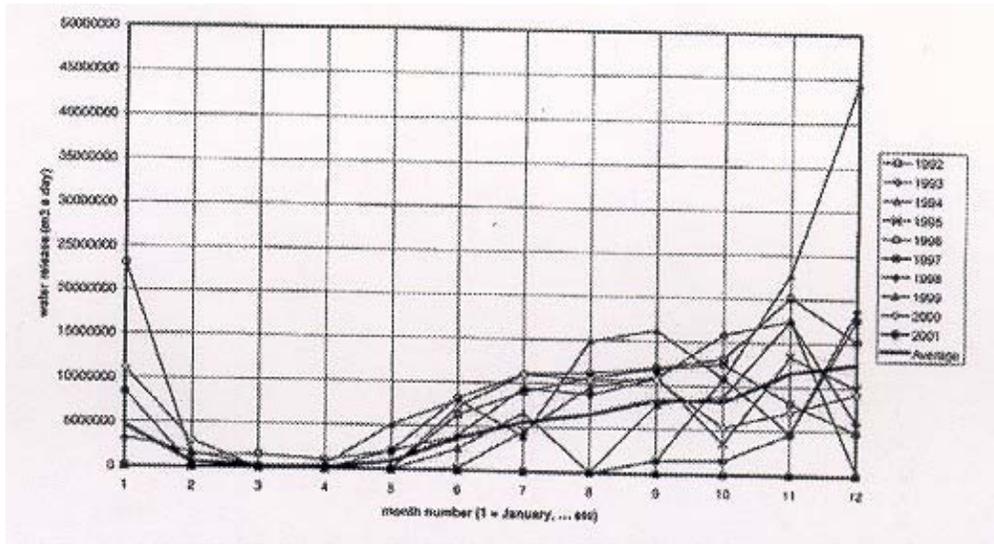


Promedios mensuales del nivel de agua del lago Gatún, período 1992-2001



Promedios mensuales del nivel de agua del lago Gatún, período 1992-2001

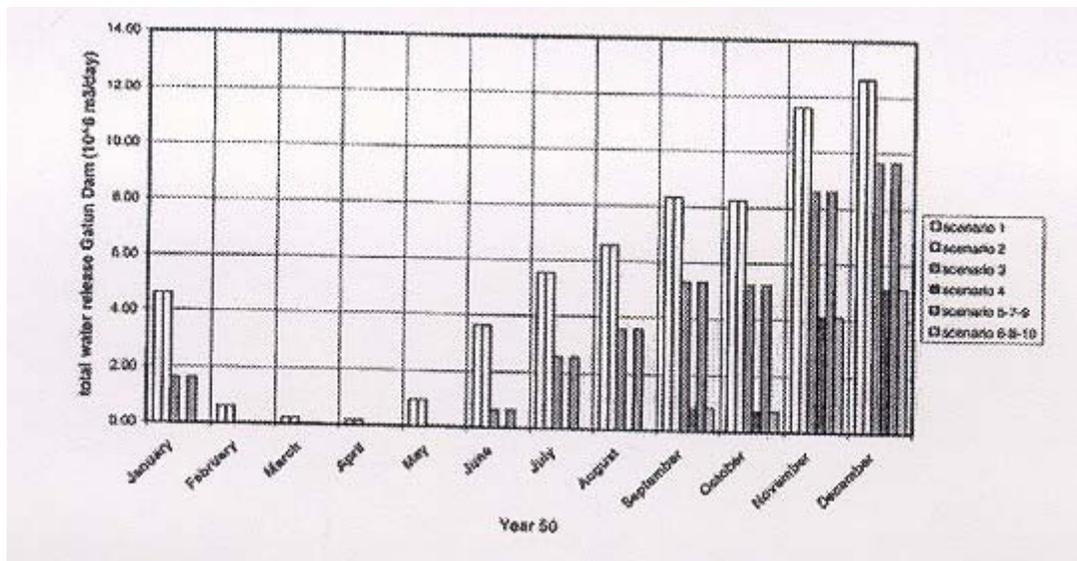
Promedios mensuales del total de las descargas de agua a la represa de Gatún, período 1992-2001



Promedios mensuales del total de las descargas de agua a la represa de Gatún, período 1992-2001

Como ejemplo, en las siguientes gráficas presentamos las cantidades adicionales de agua que se suministraron al lago Gatún provenientes de fuentes de agua dulce y que fueron descargadas en la represa de Gatún, en el caso de las esclusas Pospanamax de 3 niveles y con una intensidad de tráfico de 15 buques Pospanamax al día (año 50), en los escenarios del 1 al 10, de las simulaciones iniciales. Los valores de la descarga de agua en el escenario 1 corresponden a los valores promedio de los promedios mensuales.

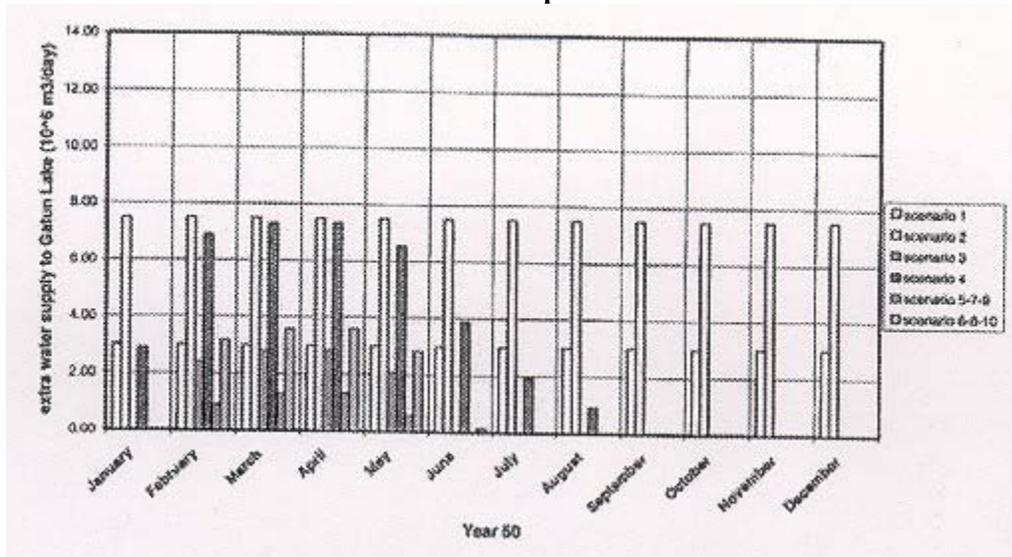
Total de la descarga de agua a la represa de Gatún por las esclusas Pospanamax, 15 buques Pospanamax





Descargas de agua a la represa de Gatún en las simulaciones iniciales, esclusas de 3 niveles, 15 buques Pospanamax al día

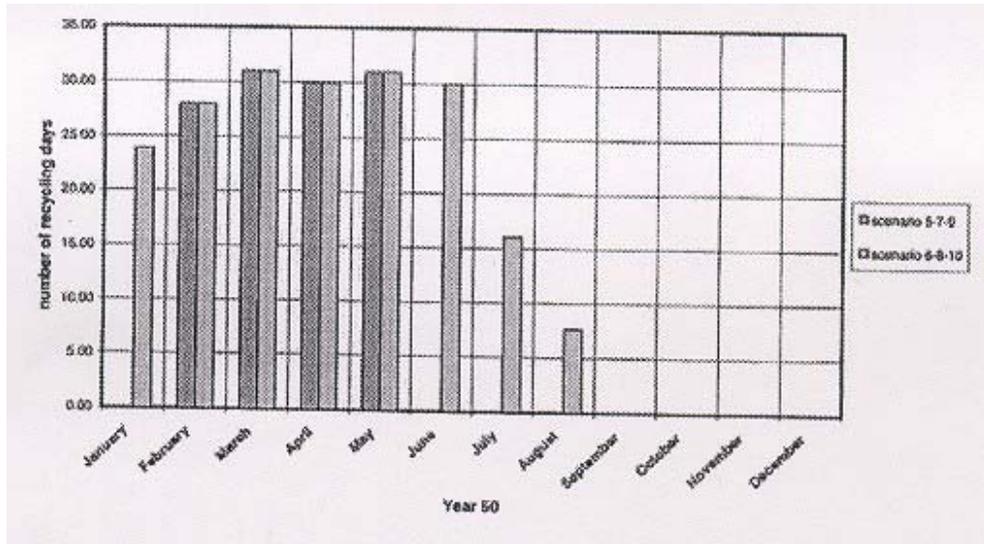
Suministro adicional de agua al lago Gatún con las esclusas Pospanamax, 15 buques Pospanamax



Suministros adicionales de agua al lago Gatún en las simulaciones iniciales, esclusas de 3 niveles, 15 buques Pospanamax al día

De la ilustración que antecede se desprende que los suministros adicionales de agua dulce se requieren aún cuando el agua sea reciclada en el lado Pacífico del Canal (escenarios 5 al 10). La ilustración a continuación muestra el número de días de reciclaje en los escenarios del 5 al 10 para las esclusas de 3 niveles, en el caso de una intensidad de tráfico de buques de 15 buques Pospanamax al día.

Número de días de reciclaje para las esclusas Pospanamax de 3 niveles, 15 buques Pospanamax



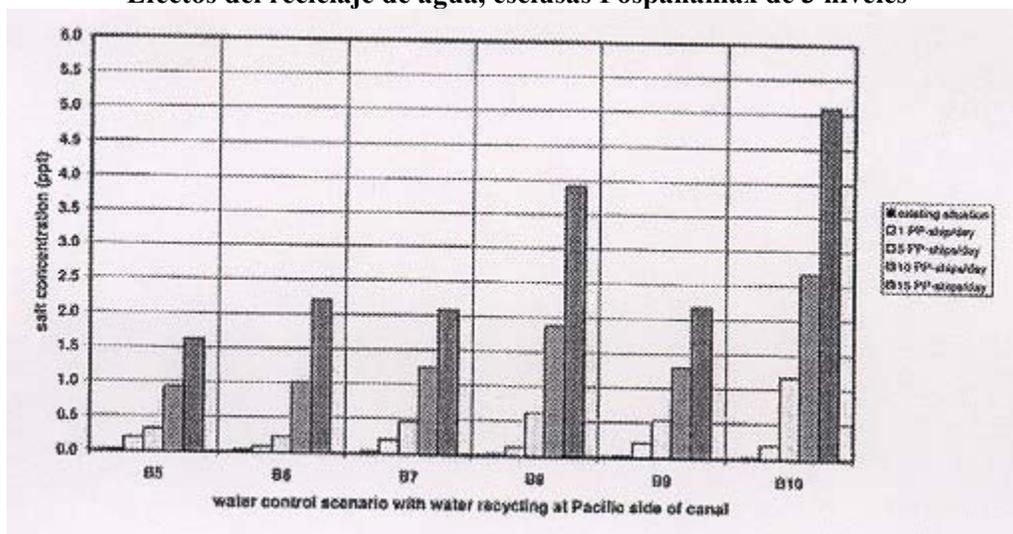
Número de días de reciclaje en las simulaciones iniciales, esclusas de 3 niveles, 15 buques Pospanamax al día

2.5. Efecto del reciclaje de agua en los niveles de concentración de sal

2.5.1 Esclusas de 3 niveles

Se analiza el efecto del reciclaje de agua con las intensidades de tráfico de 1, 5, 10 y 15 buques Pospanamax al día, además de los 36 tránsitos “normales” en las dos vías existentes. Los niveles de concentración de sal del lago Gatún y el lago Miraflores aparentan ser muy sensitivos al número de tránsitos de buques Pospanamax al día y al escenario de control de agua que se practicó para el lago Gatún.

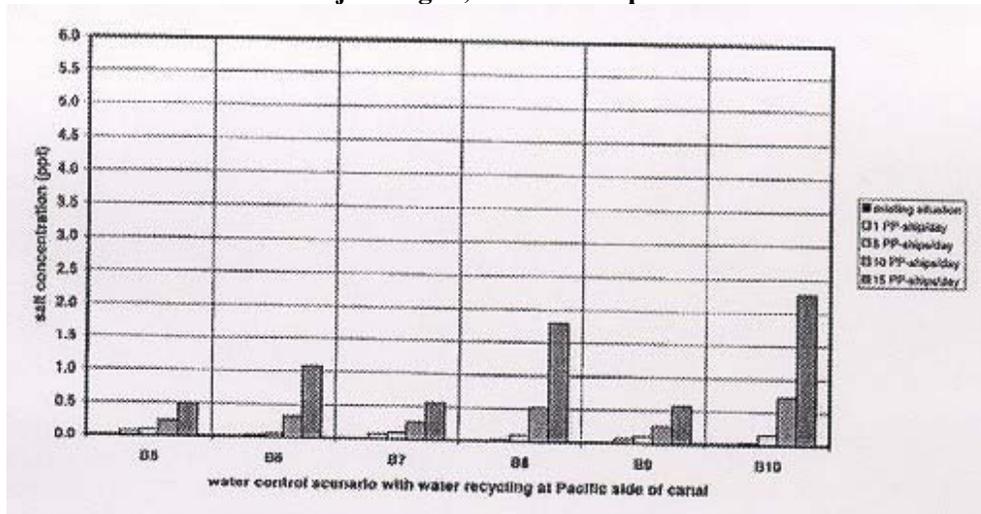
Concentración de sal en el lago Gatún (valores máximos)
Efectos del reciclaje de agua, esclusas Pospanamax de 3 niveles



Escenario de control de agua con reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal



**Concentración de sal en el lago Gatún (valores mínimos)
Efectos del reciclaje de agua, esclusas Pospanamax de 3 niveles**

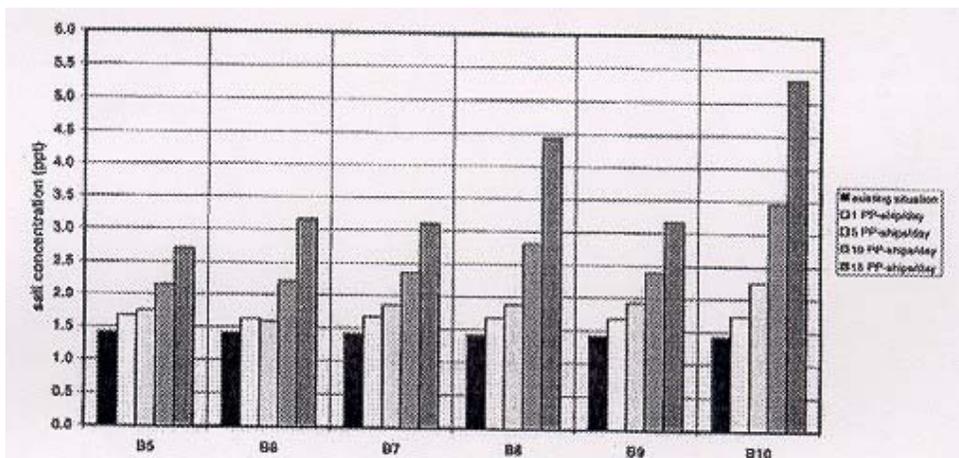


Escenario de control de agua con reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal

**Concentraciones de sal máximas y mínimas en el lago Gatún, simulaciones iniciales,
esclusas de 3 niveles**

Las gráficas anteriores muestran los valores máximos y mínimos del volumen promedio de la concentración de sal en el lago Gatún en función del número de buques y el escenario de control de agua (esclusas de 3 niveles). De estas ilustraciones se desprende que la concentración de sal en el lago Gatún aumenta considerablemente en todas las intensidades de tráfico de buques y escenarios, en comparación con la situación actual. Como es de esperarse, el reciclaje directo de la poscámara a la antecámara (escenarios B9 y B10) es la opción de reciclaje más desfavorable, el reciclaje de agua de la laguna de almacenamiento inferior a la laguna de almacenamiento superior (escenarios B5 y 6) es la opción menos desfavorable. En términos generales, el uso de tinas de reutilización de agua es favorable cuando el agua se recicla (escenarios B5, B7 y B9), ya que la cantidad de agua salada reciclada que se introduce al lago es menor. Cuando no se practica el reciclaje de agua, las tinas de reutilización de agua causan una mayor intromisión de agua salada, ya que se utiliza una menor cantidad de agua dulce en el proceso de esclusaje.

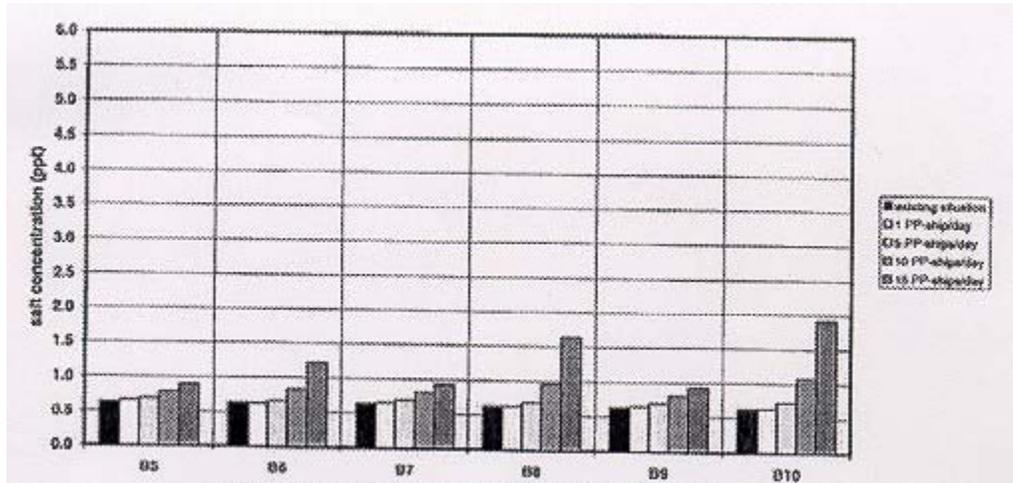
**Concentración de sal en el lago Miraflores (valores máximos)
Efectos del reciclaje de agua, esclusas Pospanamax de 3 niveles**



Escenario de control de agua con reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal



**Concentración de sal en el lago Miraflores (valores mínimos)
Efectos del reciclaje de agua, esclusas Pospanamax de 3 niveles**



Escenario de control de agua con reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal

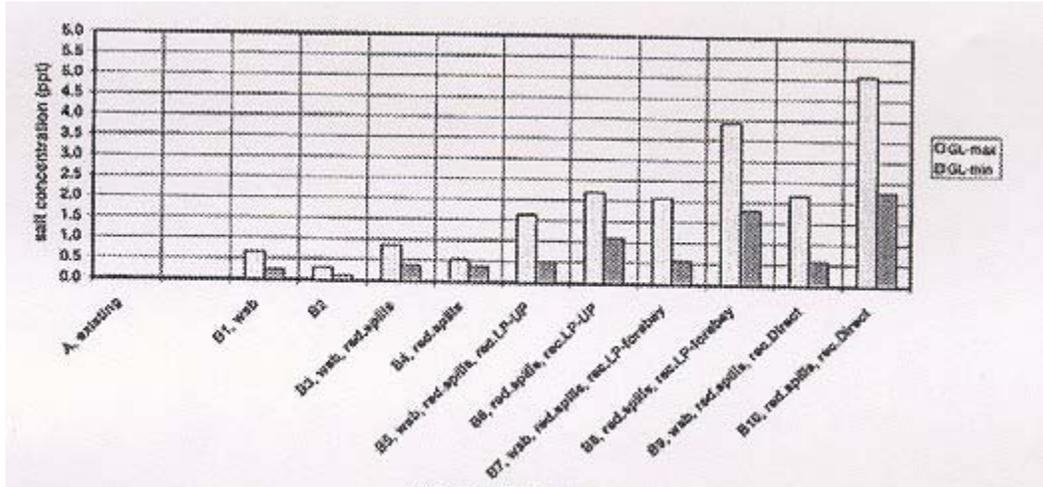
Concentraciones de sal máximas y mínimas en el lago Miraflores, simulaciones iniciales, esclusas de 3 niveles

La concentración de sal en el lago Miraflores también aumenta en todas las intensidades de tráfico y en todos los escenarios, según las ilustraciones que anteceden. Debido a que la nueva vía no utiliza el lago de Miraflores, el efecto de la misma y del reciclaje es un efecto indirecto y, por consiguiente, es menos notable.

Los resultados de esta simulación y de las simulaciones anteriores (todos los escenarios del B1 al B10, véase la tabla en la página 2-9) se reúnen en las ilustraciones a continuación. Se muestra el volumen promedio de las concentraciones de sal en el lago Gatún y en el lago Miraflores en una intensidad de tráfico de 15 buques Pospanamax al día, lo que corresponde al nivel de tráfico del año 50 después de la apertura de la nueva vía. Desde el punto de vista de la mitigación de la intrusión de agua salada, las ilustraciones demuestran claramente que los escenarios con reciclaje de agua en los períodos secos del año (B5 – B10) son una mala alternativa a los escenarios (B1 – B4), en los cuales el agua dulce es suministrada de nuevas fuentes de agua para compensar la pérdida de agua de las esclusas Pospanamax. En todos los escenarios de reciclaje de agua, el volumen promedio de concentración de sal en el lago Gatún aumenta para el año 50 por encima del límite de agua dulce. (Nota: En los Países Bajos se utiliza un valor de cloruro de 200 mg/l como valor límite de agua dulce; esto corresponde a una salinidad aproximada de 400 mg/l o 0.4 ppt. En los Estados Unidos se utiliza un valor de cloruro de 250 mg/l (aproximadamente 0.5 ppt de salinidad) como límite superior en el agua potable (norma de la Agencia de Protección del Medio Ambiente).



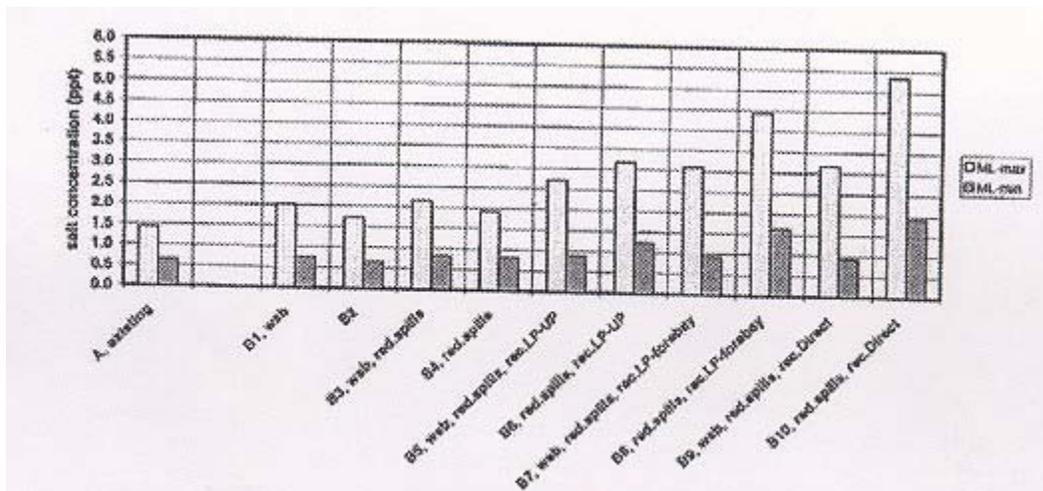
Concentración de sal en el lago Gatún en el año 50
Esclusas Pospanamax de 3 niveles, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios de control de agua



Escenario de control de agua

Concentración de sal en el lago Gatún, esclusas de 3 niveles, 15 buques al día, todos los escenarios

Concentración de sal en el lago Miraflores en el año 50
Esclusas Pospanamax de 3 niveles, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios de control de agua



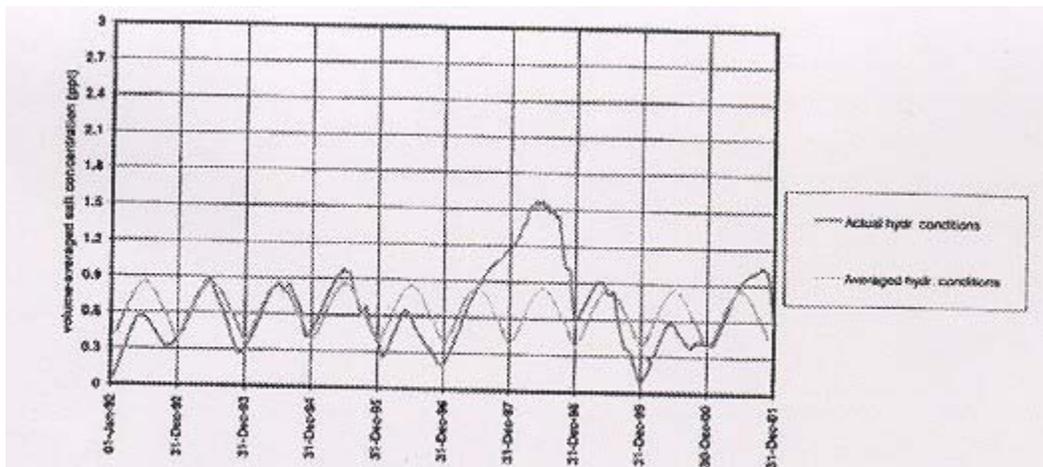
Escenario de control de agua



Concentración de sal en el lago Miraflores, esclusas de 3 niveles, 15 buques al día, todos los escenarios

Las ilustraciones que anteceden son válidas para las variaciones estacionales promediadas. Se han repetido algunas simulaciones para las esclusas de 3 niveles utilizando los niveles actuales del lago Gatún y del lago Miraflores y las descargas actuales a la represa de Gatún. Se utilizaron los datos actuales correspondientes al período 1992-2001 (promedios mensuales, las ilustraciones en las páginas 2-11 y 2-12). Este período incluye el año seco de El Niño en 1977 y el año muy lluvioso de 1999. Las ilustraciones a continuación muestran los resultados de las simulaciones con una intensidad de tráfico de 15 buques Pospanamax al día (año 50) por un período de 10 años, en las condiciones hidráulicas actuales y promediadas, utilizando también el período 1992 – 2001. Los resultados son válidos para el escenario B3, sin reciclaje de agua, véase la tabla en la página 2-9.

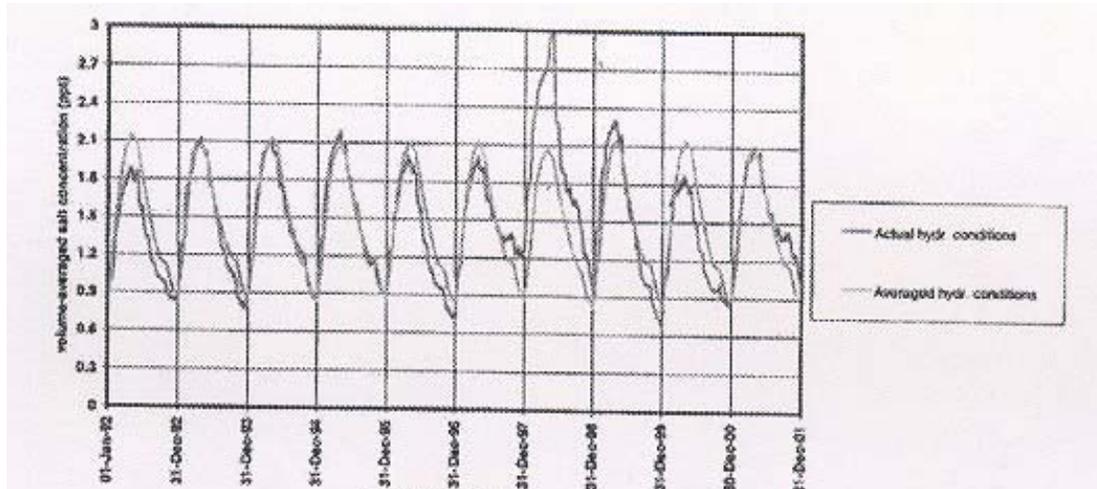
Concentración de sal en el lago Gatún Condiciones hidráulicas 1992 – 2001, escenario B3 de control de agua 15 buques Pospanamax al día



Datos de las condiciones hidráulicas



**Concentración de sal en el lago Miraflores
Condiciones hidráulicas 1992 – 2001, escenario B3 de control de agua
15 buques Pospanamax al día**



Datos de las condiciones hidráulicas

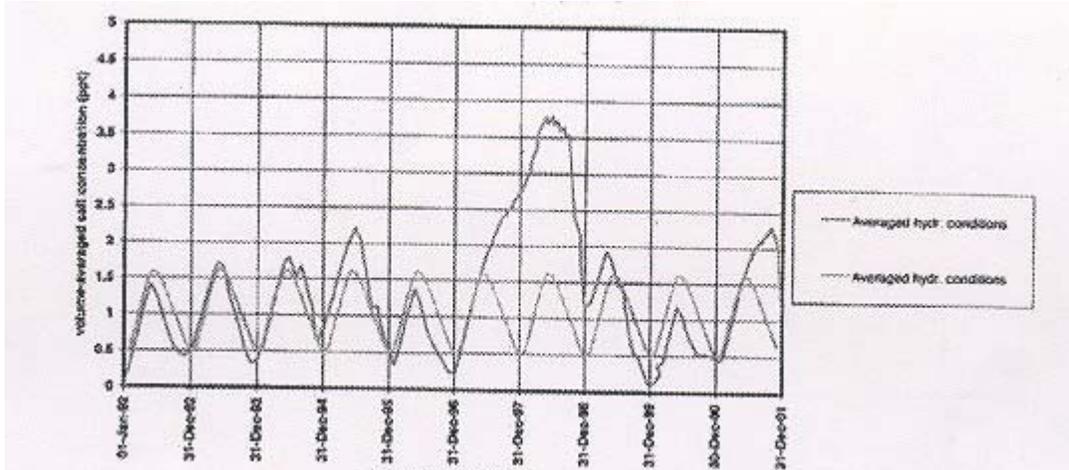
Concentración de sal en el lago Gatún y en el lago Miraflores, esclusas de 3 niveles, 15 buques postpanamax, escenario B3 (sin reciclaje), condiciones hidráulicas actuales y promediadas

Los efectos del año seco de El Niño en 1977 y los niveles extremadamente bajos de los lagos en la primera mitad de 1998 se reflejan claramente en los resultados. La concentración de sal en el lago Gatún se incrementa fuertemente durante este período. La concentración de sal en el lago Miraflores se ve indirectamente afectada (la nueva vía no utiliza el lago), y también aumenta. El próximo año lluvioso, 1999, causa una reducción significativa en la concentración de sal en el lago Gatún; le sigue la concentración de sal en el lago Miraflores. Como puede observarse (compare la línea azul con la línea gris), cuando se toman en consideración las condiciones actuales, la concentración de sal en el lago Gatún es de aproximadamente el doble de alta en 1998; y en el siguiente año lluvioso, 1999, la concentración de sal baja mucho más que con las condiciones hidráulicas promedio. Esto se debe a la fuerte precipitación y los derrames de grandes cantidades de agua a la represa de Gatún en la segunda mitad del año lluvioso de 1999.

Se obtuvieron resultados similares en los escenarios B5 (reciclaje de la laguna inferior a la laguna superior) y B9 (reciclaje directo de la poscámara a la antecámara de la esclusa). Tal como lo muestran las siguientes ilustraciones para el escenario B5, los efectos de las condiciones hidráulicas actuales en lugar de los de las condiciones hidráulicas promediadas, es decir, variaciones estacionales más marcadas en la concentración de sal en los lagos, se intensifican un poco cuando se practica el reciclaje.

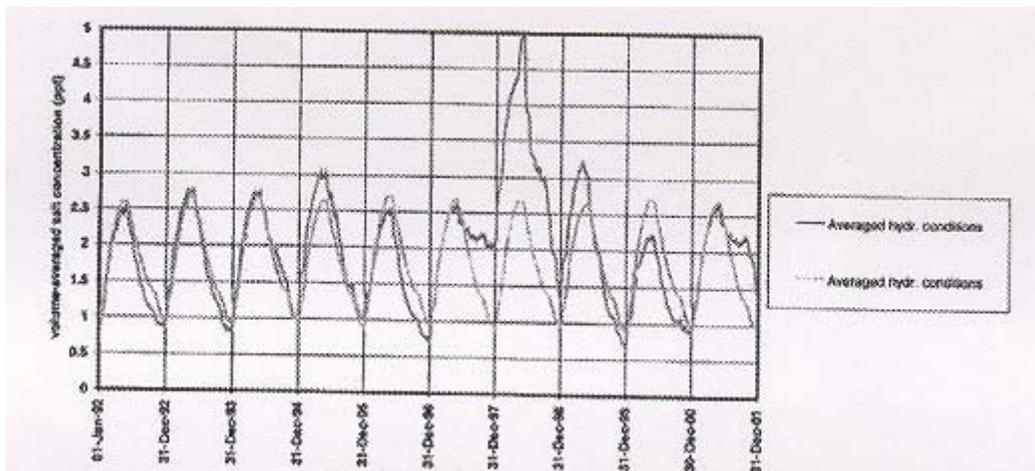


**Concentración de sal en el lago Gatún
Condiciones hidráulicas 1992 – 2001, escenario B5 de control de agua
15 buques Pospanamax al día**



Datos de las condiciones hidráulicas

**Concentración de sal en el lago Miraflores
Condiciones hidráulicas 1992 – 2001, escenario B5 de control de agua
15 buques Pospanamax al día**



Datos de las condiciones hidráulicas

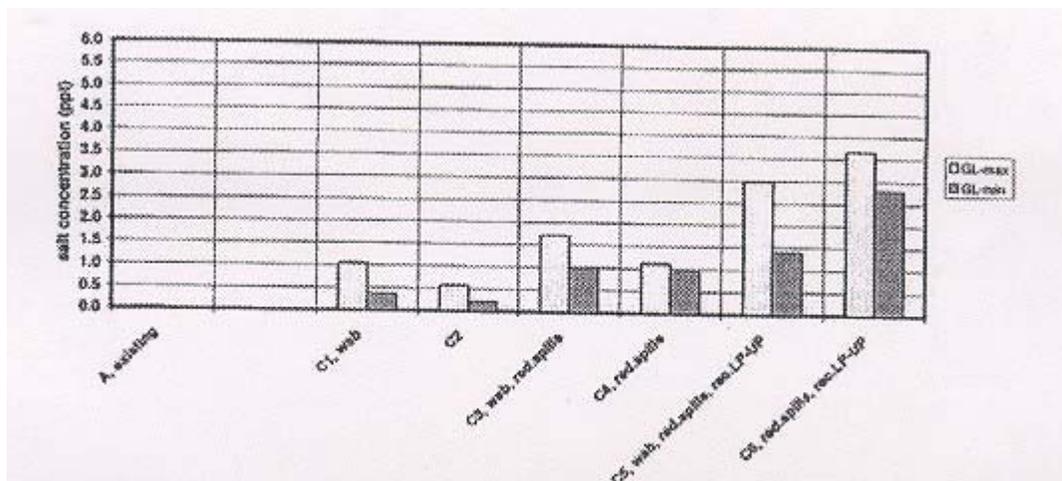
Concentración de sal en el lago Gatún y en el lago Miraflores, esclusas de 3 niveles, 15 buques postpanamax, escenario B5 (reciclaje de laguna inferior a laguna superior), condiciones hidráulicas actuales y promediadas



2.5.2 Esclusas de 2 niveles y esclusas de un solo nivel

Se han ejecutado un número limitado de simulaciones de intromisión de sal para las esclusas de 2 niveles y las esclusas de un solo nivel mediante la aplicación de la opción 3 de reciclaje (reciclaje de laguna inferior a laguna superior), véase la tabla en la página 2-9. Estas simulaciones se hicieron utilizando las condiciones hidráulicas promediadas del período 1992 – 2001, de modo que las variaciones estacionales extremas fueron eliminadas. En las gráficas a continuación, se comparan los resultados de estas simulaciones (volumen promedio de concentración de sal en el lago Gatún y en el lago Miraflores) con los resultados de las simulaciones anteriores sin reciclaje. La comparación se hace para el año 50, con una intensidad de tráfico de 15 buques Pospanamax al día en la nueva vía.

Concentración de sal en el lago Gatún en el año 50
Esclusas Pospanamax de 2 niveles, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios de control de agua

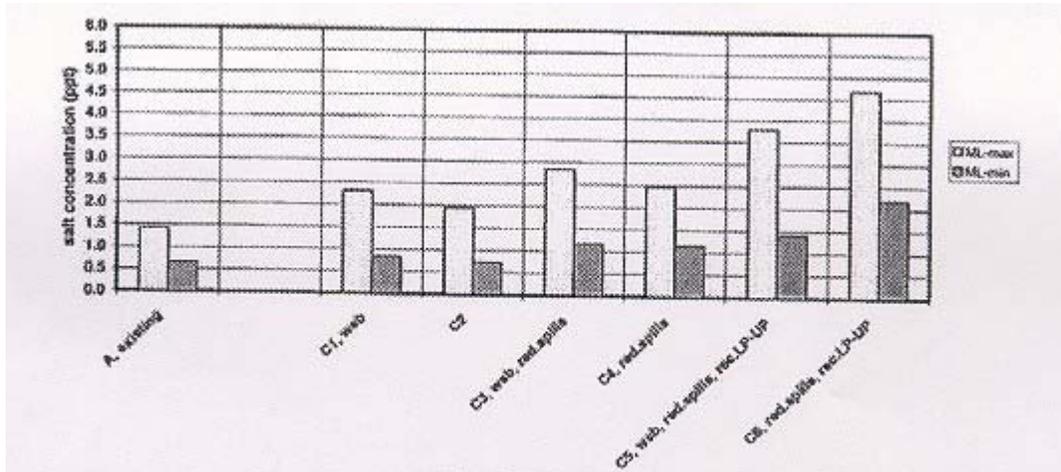


Escenario de control de agua

Concentración de sal en el lago Gatún, esclusas de 2 niveles, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios



Concentración de sal en el lago Miraflores en el año 50
Esclusas Pospanamax de 2 niveles, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios de control de agua

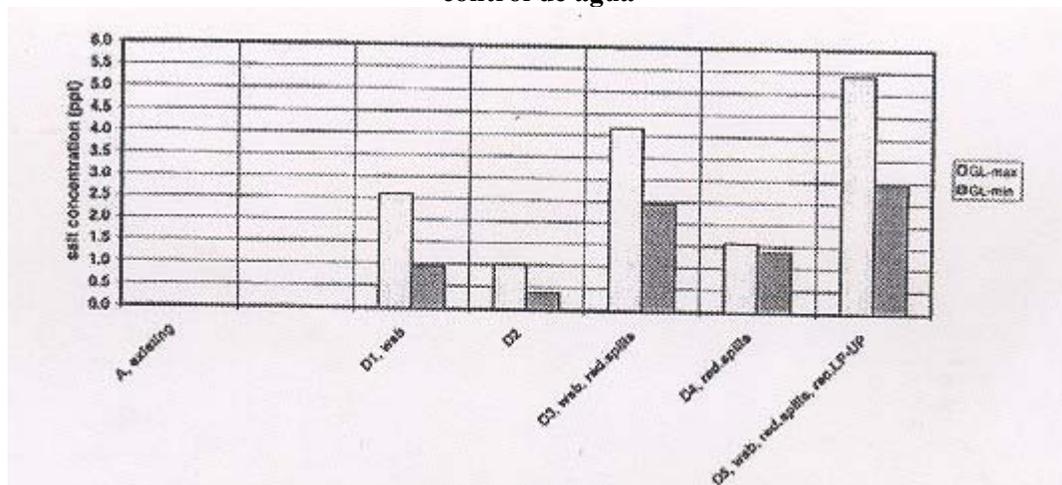


Escenario de control de agua

Concentración de sal en el lago Miraflores, esclusas de 2 niveles, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios

Resultados para las esclusas de un solo nivel:

Concentración de sal en el lago Gatún en el año 50
Esclusas Pospanamax de 1 solo nivel, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios de control de agua

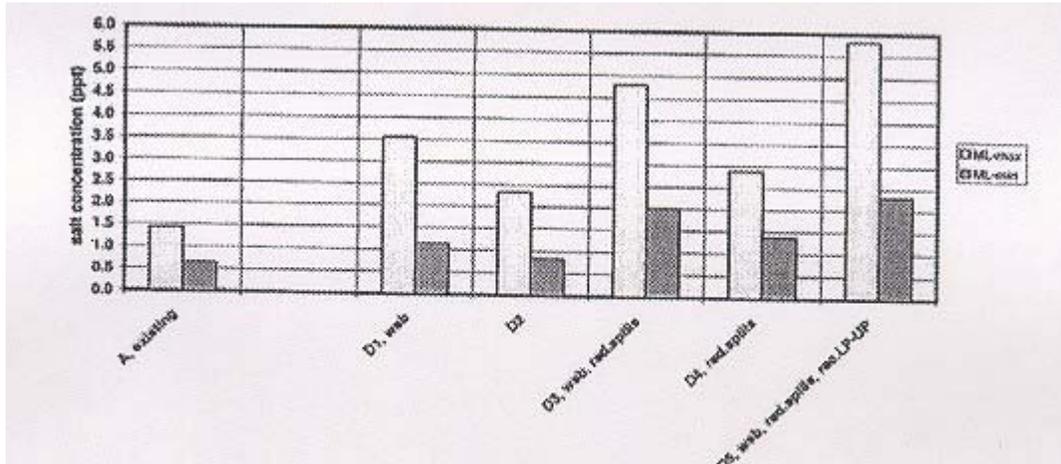


Escenario de control de agua

Concentración de sal en el lago Gatún, esclusas de 1 solo nivel, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios



Concentración de sal en el lago Miraflores en el año 50
Esclusas Pospanamax de 1 solo nivel, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios de control de agua



Escenario de control de agua

Concentración de sal en el lago Miraflores, esclusas de 1 solo nivel, 15 buques Pospanamax al día, todos los escenarios

2.6 Conclusiones del reciclaje de agua

Se llevó a cabo un estudio sobre los efectos del reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal en los niveles de concentración de sal en el lago Gatún y en el lago Miraflores. La ACP considera el reciclaje de agua como una alternativa para el suministro de agua proveniente de nuevas fuentes de agua. Cuando, durante los períodos secos, no hay fuentes de abastecimiento de agua dulce y el nivel de agua del lago Gatún desciende por debajo del mínimo requerido para la navegación, el reciclaje de agua puede compensar en parte la pérdida de agua resultante de las operaciones de las esclusas.

Se analizó la intromisión de agua salada con una intensidad de tráfico de 1, 5, 10 y 15 buques Pospanamax al día. Esta última intensidad de tráfico es la que se anticipa para el año 50 después de la apertura de la tercera vía. Se mantuvo el número de tránsitos en la vía oeste – este en el número actual de 18 buques al día en cada vía. Se aplicaron diferentes escenarios para el control del nivel de agua en el lago Gatún, lo que incluyó diferentes opciones de reciclaje de agua. Estas opciones fueron: (1) reciclaje directo de la poscámara a la antecámara de la esclusa, (2) reciclaje de la laguna de almacenamiento inferior a la antecámara de la esclusa, (3) reciclaje de la laguna de almacenamiento inferior a la laguna de almacenamiento superior. Se estudiaron los efectos del reciclaje de agua para las esclusas Pospanamax de tres niveles (todas las tres opciones), las esclusas Pospanamax de 2 niveles (opción 3) y las esclusas Pospanamax de un solo nivel (opción



3). Se extendió el modelo Swinlocks de simulación de intromisión de agua con estas opciones de reciclaje. Los elementos principales en los escenarios de control de agua en el lago Gatún son: la utilización de tinas de reutilización de agua en las esclusas Pospanamax y una reducción en las cantidades de agua que se vierten a la represa de Gatún y / o que se utilizan para la generación de energía hidroeléctrica.

Las conclusiones generales que emergen de las simulaciones de la intromisión de agua salada son:

- El reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal ocasiona un fuerte incremento en los niveles de concentración de sal en el lago Gatún y en el lago Miraflores. Como bien puede esperarse, el reciclaje directo de la poscámara a la antecámara de las esclusas es la opción de reciclaje más desfavorable. El reciclaje de la laguna inferior a la laguna superior es la opción menos desfavorable; en este caso el nivel de concentración de sal en el lago Gatún pudiese ser el doble de alta que el de los escenarios en que el abastecimiento de agua dulce proviene de nuevas fuentes en lugar de agua reciclada, siempre y cuando se apliquen las tinas de reutilización de agua. El uso de las tinas de reutilización de agua es favorable cuando se practica el reciclaje de agua, ya que en ese caso se necesita reciclar una cantidad menor de agua salada.
- Desde el punto de vista de mitigación de la intromisión de agua salada, los escenarios que utilizan el reciclaje agua son una mala alternativa. Este es el caso para todas las configuraciones de esclusas e intensidades de tráfico de buques.
- No obstante el reciclaje de agua en el lado Pacífico del Canal, durante los períodos secos todavía se requiere agua dulce adicional proveniente de nuevas fuentes de agua.

También se prestó suma atención a los efectos de los extremos en las variaciones hidráulicas estacionales, tales como los años secos de El Niño y los años muy lluviosos. En los años secos, el nivel de agua del lago Gatún desciende al mínimo, no se hacen descargas de agua a la represa de Gatún, y – como una opción futura – se inicia el reciclaje de agua. Las fuertes precipitaciones en los años lluviosos suministran las grandes cantidades de agua que abastecen al lago Gatún y, para restringir el ascenso del nivel de agua, se vierten grandes cantidades de agua a la represa de Gatún.

Las condiciones hidráulicas del período 1992 -2001, incluyendo el año seco de 1997 y el año lluvioso de 1999, fueron modeladas en el modelo Swinlocks de simulación de intromisión de agua salada. Las simulaciones se ejecutaron para esclusas Pospanamax de 3 niveles (con tinas de reutilización de agua) con diferentes escenarios de control de agua en el lago Gatún y diferentes intensidades de tráfico de buques en la nueva vía.

Los extremos en las condiciones hidráulicas se reflejaron claramente en los resultados de las simulaciones de la intromisión de agua salada. Un año seco causó un dramático aumento en el volumen promediado de concentración de sal en el lago Gatún, mientras que el derrame de grandes cantidades de agua en un año lluvioso ocasionó un descenso significativo en la concentración de sal. El lago Miraflores no se ve directamente afectado por la navegación en la nueva vía (la nueva vía no utiliza el lago), aunque los extremos en las condiciones hidráulicas también se vieron reflejados en el volumen promediado de concentración de sal en el lago Miraflores.



Cuando se aplican variaciones reales en lugar de variaciones estacionales promediadas como los datos en el modelo de simulación, la concentración máxima de sal en el lago Gatún y el lago Miraflores pudiese ser un factor de hasta 2 veces más alto en los años secos, pero de igual forma pudiese ser mucho más bajo en los años lluviosos (condiciones hidráulicas igual al período 1992 – 2001 constituyen la base de esta comparación). Este es el caso para todas las intensidades simuladas de tráfico de buques. También parece ser que el efecto de los extremos en las condiciones hidráulicas se intensifica cuando el agua es reciclada.

Para el pronóstico de los futuros niveles de concentración de sal en los lagos, el cual se utilizaría en la comparación mutua de las diferentes configuraciones de esclusas o en un análisis de medidas de mitigación, el mejor enfoque sigue siendo empezar de las variaciones hidráulicas estacionales promediadas. Para propósitos del diseño final, también se deben tomar en consideración los efectos de los extremos en las condiciones hidráulicas.



3. Medidas de mitigación de la intromisión del agua salada

Se llevó a cabo un estudio de las posibilidades de reducir la intromisión de agua salada a través de las esclusas del Canal de Panamá. Se identificaron, revisaron y se describieron sistemas alternos de mitigación y se evaluó su eficacia y adecuación para su uso en el Canal de Panamá.

3.1. Proceso de la intromisión del agua salada

Para una evaluación de la efectividad de las medidas de mitigación de la intromisión de agua salada, se requiere de gran conocimiento de los momentos más críticos de las operaciones de las esclusas ascendentes y descendentes. Se identificaron las siguientes fases como las más importantes:

- La fase en la cual el buque transita de la cámara inferior de la esclusa hacia la poscámara de la esclusa es una fase crítica del proceso de esclusaje descendente; el flujo de retorno trae consigo una gran cantidad de agua salada de la poscámara a la cámara de la esclusa, a la vez que se crea una fuerte densidad de corriente que se propaga a una velocidad relativamente alta dentro de la cámara de la esclusa (ocasionada por la gran diferencia de densidad $\Delta\rho$ entre la poscámara y la cámara de la esclusa).
- La fase de esclusaje ascendente, cuando un buque transita de la poscámara hacia la cámara inferior de la esclusa, también es una fase crítica, en particular cuando se abren las compuertas de las esclusas mucho antes de que entre el buque. En este caso, los flujos de densidad ocasionan un intercambio casi total de agua.
- Durante ambos, el esclusaje descendente y el esclusaje ascendente, los chorros de llenado ocasionan una mezcla considerable de agua en las cámaras receptoras de las esclusas, lo que resulta en una concentración de sal más o menos uniforme al finalizar el proceso de nivelación de agua. Esto es claramente desfavorable, particularmente durante un esclusaje descendente, ya que esta mezcla es la causa de que mayor cantidad de sal migre hacia las esclusas superiores y a la antecámara de las esclusas.
- En términos generales, el esclusaje descendente de buques es muy crítico en vista de la intromisión de agua salada. Una mayor cantidad de agua salada se transfiere en dirección aguas arriba cuando un buque transita hacia abajo que cuando transita hacia arriba. Esto se debe a dos causas principales: (i) en las operaciones de tránsito tipo semiconvoy, la cámara inferior vacía (esclusaje descendente) contiene más agua salada antes de que el agua sea nivelada que durante un esclusaje ascendente cuando el buque está en la cámara inferior de la esclusa, y (ii) cuando después de nivelar el agua el próximo buque entra a la cámara de la esclusa (esclusaje descendente), se transfiere más agua salada en dirección aguas arriba debido al desplazamiento de agua ocasionado por el buque. Por lo tanto, las medidas para prevenir o mitigar la intromisión del agua salada deben ser diseñadas preferiblemente para las operaciones de esclusajes descendentes.

3.2 Medidas de mitigación

3.2.1 Reseña de las medidas

Los métodos que tienen como objetivo mitigar la intromisión del agua salada pueden subdividirse en tres grupos, cada grupo enfocado hacia las medidas o acciones de una fase específica del proceso de esclusaje. Se señalan las medidas que se detallan a continuación:



- A. Reducir la cantidad que agua salada que se introduce a la cámara de la esclusa y posteriormente al Canal:
 - 1. Medidas operacionales
 - 2. Retrasar y reducir el intercambio de agua salada y agua dulce entre la poscámara y la cámara de la esclusa o la cámara y la antecámara de la esclusa mediante el uso de barreras neumáticas (o filtros de burbujas de aire)
 - 3. Limitar el intercambio de agua salada y agua dulce entre la cámara y la antecámara de la esclusa mediante disposiciones especiales, así como una barrera ajustable en el piso
- B. Remover el agua salada que ha entrado a las esclusas:
 - 1. Descargar el agua cerca de las esclusas mediante la utilización del sistema de llenado de las esclusas o desagües especiales para descargar el agua
 - 2. Drenar la lengua de agua salada mediante una cuneta en el piso en el lado corriente arriba de las compuertas de las esclusas, inmediatamente después de que la lengua de agua salada sale de la cámara de la esclusa y entra al Canal
 - 3. Recoger el agua salada en un pozo en el lado corriente arriba de las esclusas y descargar el pozo
- C. Prevenir la migración aguas arriba del agua salada proveniente de la cámara inferior de la esclusa
 - 1. Utilizar la diferencia de densidad entre el agua salada y el agua dulce y el escalón en el piso para prevenir la migración de agua salada de la cámara inferior de la esclusa a niveles más altos
 - 2. Remover el agua salada de la cámara inferior de la esclusa

No se analizan sistemas especiales de esclusas tales como elevadores mecánicos ya que los mismos, hasta la fecha, no han sido desarrollados para grandes buques de alta mar y tampoco han sido considerados por parte de la ACP como una alternativa viable a las esclusas convencionales.

3.2.2 Factibilidad y efectividad de las medidas

A. Reducir la cantidad de agua salada que se introduce a la cámara de la esclusa y posteriormente al Canal:

Al Medidas operacionales

Las medidas operacionales que son factibles y pudiesen lograr una reducción significativa de la intromisión de agua salada son (i) optimizar el proceso de esclusaje (minimizar el número de esclusajes) y (ii) reducir el tiempo total que las compuertas permanecen abiertas, especialmente las compuertas en las poscámaras de las esclusas, a aproximadamente 15 minutos. Ambas medidas reducen la intromisión de agua salada ocasionada por las diferencias de densidad. La minimización del número de esclusajes ya se practica en la ACP en las esclusas existentes, en la medida que los reglamentos de seguridad lo permite, y esta medida también debiera ponerse en práctica cuando se construyan las esclusas Pospanamax. Sin embargo, las dimensiones de los buques Pospanamax y de los más grandes que los buques Panamax (*Panamax Plus*) son tales que difícilmente se podrían combinar con los buques Panamax actuales en una sola cámara de las esclusas; por consiguiente, el efecto de esta medida sería limitado.



A2 Retrasar y reducir el intercambio de agua salada y agua dulce mediante el uso de barreras neumáticas

El uso de barreras neumáticas en la poscámara y la antecámara de las esclusas pudiese mitigar la intromisión total del agua salada a las esclusas Pospanamax en un máximo de 30% (límite superior anticipado). No se impide la intromisión del agua salada restringida exclusivamente al buque. Se requiere una descarga de aire de aproximadamente 250 m³/s (a presión atmosférica) para una barrera en la poscámara de la esclusa; una segunda barrera en la antecámara de la esclusa puede requerir menos de la mitad de la descarga de aire; esta segunda barrera tiene un menor efecto. Ya que todavía no se han aplicado las barreras neumáticas en aguas a una profundidad de 20 metros o más, es recomendable hacer un estudio adicional de su rendimiento. La barrera neumática tiene la ventaja de que no ocasiona ni pérdidas adicionales de agua dulce, ni retrasos en la navegación; sin embargo, los yates pequeños no pueden pasar por las barreras neumáticas sin riesgos.

A3 Limitar el intercambio de agua salada y agua dulce entre la cámara y la antecámara de la esclusa mediante la utilización de una barrera ajustable

Una barrera ajustable a la entrada de la antecámara de la esclusa puede reducir la intromisión de agua salada a las esclusas Pospanamax hasta un máximo de 5%. No se impide la intromisión del agua salada restringida exclusivamente al buque. Cuando el funcionamiento de la barrera ajustable falla, se suscita el riesgo de que el buque en tránsito colisione. Por lo tanto, la barrera ajustable debe ser diseñada a manera de prevenir daños al buque. La barrera tiene la ventaja de que no hay pérdida adicional de agua dulce. No se retrasa la navegación.



B. Remover el agua salada que ha entrado a las esclusas

B1 Descargar el área próxima a las esclusas

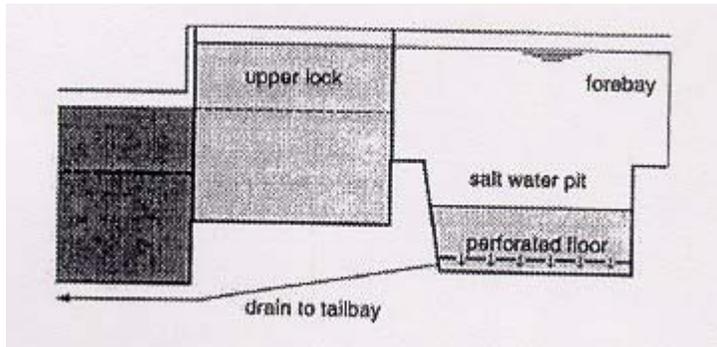
El método de descarga directa puede ser factible en el Corte Culebra, pero no en el área próxima a las esclusas de Gatún. Una descarga eficaz requiere de la disponibilidad de grandes cantidades de agua dulce durante todo el año, lo cual es, sin embargo, cuestionable en el Canal de Panamá. Se anticipa que la eficacia del método de descarga será relativamente pequeña, en cuanto al lago Gatún entero. Las descargas pueden ayudar a mantener la salinidad del agua en el área cercana a la toma de agua potable en el Corte Culebra por debajo del valor límite de agua dulce, pero una mejor propuesta sería tomar el agua potable directamente del lago Alhajuela. Para prevenir cualquier obstáculo a la navegación, las descargas podrían requerir un canal de descarga de agua separado que no pase por las esclusas. En términos generales, las descargas no ocasionarían demoras a la navegación, siempre y cuando no haya obstáculos en la antecámara y la poscámara de las esclusas y se seleccionen bien los períodos de descarga. Un modo intermitente de descarga con alta descarga de agua es más efectivo que una descarga continua con poca descarga de agua.

B2 Drenar la lengua de sal mediante una cuneta en el piso

Un sistema que retorne el agua salada mediante una cuneta en el piso en el lado corriente arriba de las esclusas puede resultar efectivo para reducir la intromisión de agua salada (límite superior anticipado 30% - 50%), pero la pérdida total de agua (agua dulce y agua salada) puede ser, al mismo tiempo, considerable. La pérdida total de agua del lago es del mismo orden de magnitud que la pérdida normal de agua de una esclusa Pospanamax de 3 niveles (sin tinas de reutilización de agua). El proceso de drenaje de agua salada es difícil de controlar, también debido a las diferencias entre los esclusajes ascendentes y los esclusajes descendentes, lo que hace que el agua dulce inevitablemente se escape con el agua salada a través de la cuneta de desagüe. Cuando el agua drenada retorna directamente a la poscámara de la esclusa, esto podría obstaculizar el paso de los buques y, por consiguiente, la navegación se retrasaría.

B3 Recoger el agua salada en un pozo en el lado corriente arriba de las esclusas y descargar el pozo

Cuando se construye un pozo para agua salada en el lado corriente arriba de las esclusas, se puede recoger la mayor parte del agua salada que se introduce en la antecámara de la esclusa, para posteriormente descargarla a baja velocidad en la poscámara de la esclusa (límite superior anticipado de reducción de la intromisión de agua salada 60% - 90%). El pozo debe ser lo suficientemente profundo como para minimizar la mezcla de agua salada y agua dulce durante el tránsito de un buque, y debe tener suficiente volumen. Se puede reducir la pérdida de agua dulce a través de la cuneta de desagüe si se le hace un piso perforado al pozo (extracción vertical del agua salada similar a la de las esclusas existentes). En ese caso, la pérdida total de agua (agua salada y agua dulce) será mucho menor que con una cuneta en el piso. El riesgo de obstáculos a la navegación ocasionado por la descarga de agua a la poscámara de la esclusa también sería menor y, por consiguiente, sería poco probable que se ocasionen demoras en la navegación.

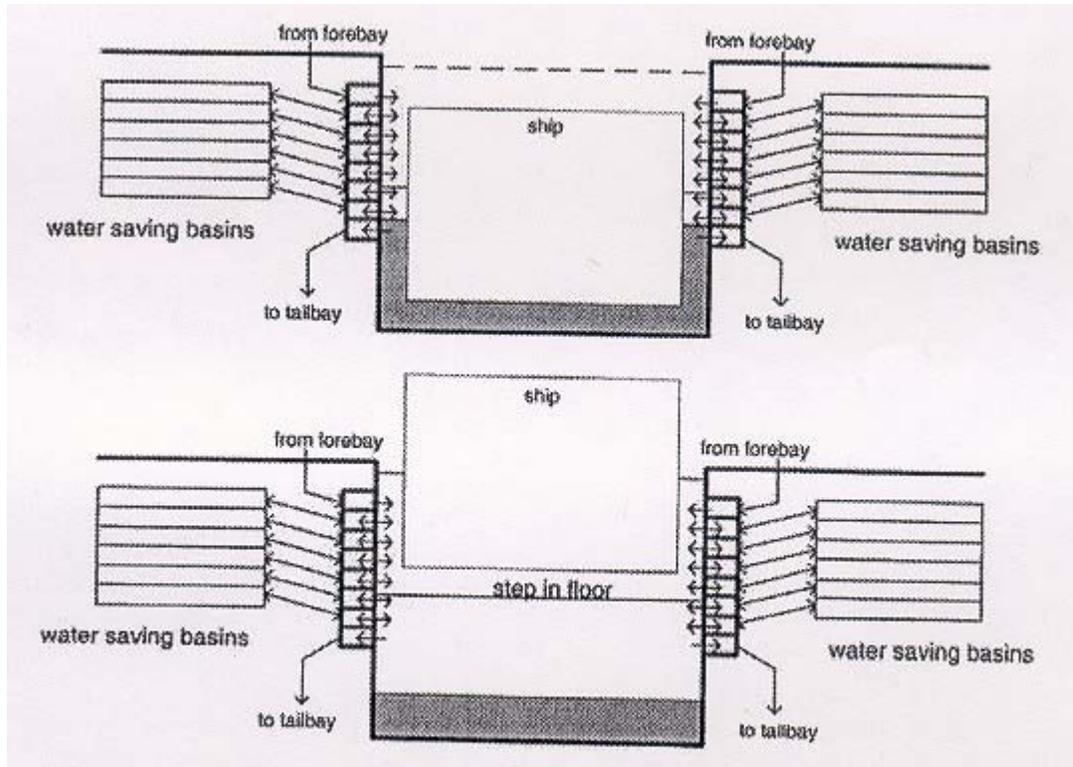


Extracción de agua salada del pozo para agua salada con piso perforado

C. Prevenir la migración aguas arriba del agua salada proveniente de la cámara inferior de la esclusa

CI Utilizar la diferencia de densidad entre el agua salada y el agua dulce y el escalón en el piso para prevenir la migración de agua salada de la cámara inferior de la esclusa a niveles más altos

Se puede obtener una reducción considerable de la intromisión de agua salada mediante un sistema diseñado para mantener el agua salada en la cámara inferior de la esclusa durante las operaciones de esclusaje (límite superior anticipado de reducción de la intromisión de agua salada 90%). El escalón ascendente en el piso en el lado corriente arriba de las cámaras inferiores de las esclusas constituye un elemento crucial de este sistema. En vista del alto requerido para el paso, este sistema es más apropiado para la configuración de esclusas de un solo nivel (con tinas de reutilización de agua; no se consideraron esclusas de un solo nivel sin tinas de reutilización de agua). Otro elemento crucial del sistema es el sistema de llenado / vaciado por el muro, con aberturas en ambos muros de las esclusas por encima de la capa de agua salada en la cámara de las esclusas. Mediante un llenado / vaciado cuidadoso, se puede prevenir en gran medida la mezcla de agua salada y agua dulce. En el caso de la configuración de esclusas de un solo nivel, el agua salada permanece por debajo del nivel del escalón en el piso, lo que previene el escape de agua salada a la antecámara de la esclusa, siempre y cuando el buque transite lentamente sin hacer mucho uso de su máquina. El sistema no ocasiona la pérdida adicional de agua. Debido a que el llenado y vaciado de las esclusas, al igual que la maniobrabilidad de un buque, tienen que ejecutarse muy cuidadosamente, es inevitable que ocurra un retraso en la navegación. Sin embargo, el tiempo total requerido para un esclusaje en esclusas de un solo nivel puede ser menos que en la configuración normal de esclusas de 3 niveles, o hasta que en la configuración normal de esclusas de 2 niveles. En vista de la amplitud de la marea, pueda que sea necesario instalar compuertas levadizas verticales en las aberturas inferiores de llenado en los muros de las esclusas del lado Pacífico. Se requiere un estudio exhaustivo de los aspectos pertinentes del sistema cuando se aplica a las esclusas Pospanamax.



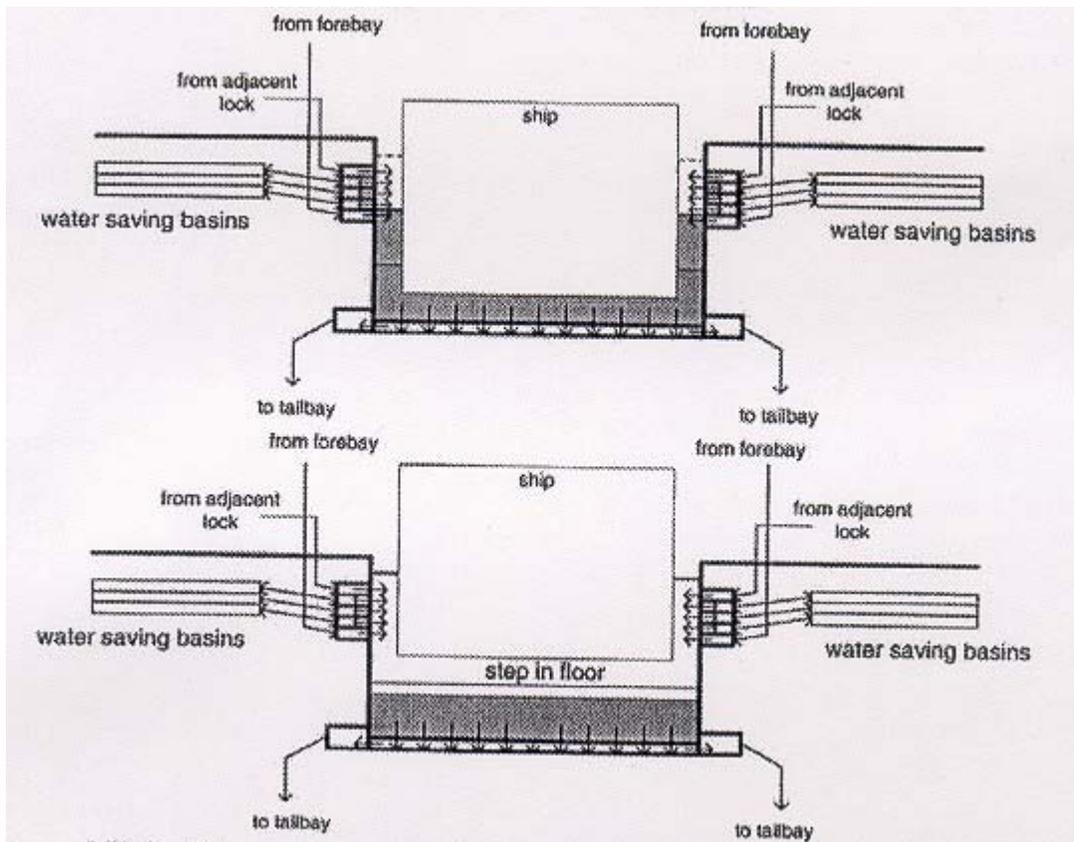
Esclusas Pospanamax de un solo nivel con tinas de reutilización de agua y sistema de llenado / vaciado por el muro; buque en la cámara de la esclusa; esclusaje ascendente; situación antes v después del llenado

C2 Remover parcialmente el agua salada de la cámara inferior de la esclusa

La intromisión del agua salada se puede reducir efectivamente con un sistema diseñado para intercambiar el agua salada en la cámara de las esclusas con el agua dulce en la antecámara de la esclusa (límite superior anticipado de reducción de la intromisión de agua salada 90%). El sistema es necesario únicamente en la cámara inferior de la esclusa y es apropiado para las configuraciones de esclusas de 3 niveles y de 2 niveles. El agua dulce se suministra a través de las aberturas en los muros de las esclusas (las aberturas inferiores están ubicadas cerca de la superficie inicial de agua salada), mientras el agua salada se descarga simultáneamente a la poscámara de la esclusa a través de aberturas en el piso. Este es un proceso delicado ya que el agua dulce que se abastece y el agua salada que se extrae tienen que tener un balance, en tanto pueda que el agua dulce que se suministra no se mezcle con el agua salada. Si esto se ejecuta cuidadosamente, se puede prevenir en gran manera la mezcla de agua salada con el agua dulce. El intercambio de agua salada se detiene cuando hay una amplia interfase de agua salada – agua dulce por debajo del nivel del escalón en el piso a la entrada de la próxima esclusa. El escalón en el piso previene el escape de agua salada a las esclusas superiores y a la antecámara de las esclusas en la fase en que las compuertas están abiertas, siempre y cuando los buques transiten despacio y no hagan mucho uso de sus máquinas. El sistema ocasiona una pérdida adicional de



agua. Esta pérdida adicional de agua se puede prevenir aplicando tinas de reutilización de agua, pero la aplicación de estas tinas reduce la efectividad del sistema, ya que ocurrirá una acumulación de agua salada en las tinas de reutilización de agua. Además, en el caso de las tinas de reutilización de agua, se requieren bombas. El llenado y vaciado de las esclusas, al igual que la maniobrabilidad del buque, se tienen que ejecutar muy cuidadosamente, por lo cual es inevitable que ocurra un retraso en la navegación. El sistema es algo complejo y requiere de una operación cuidadosa, en especial en el lado Pacífico, donde hay grandes fluctuaciones de la marea. Se requiere de un estudio exhaustivo de los aspectos pertinentes del sistema cuando se aplica a las esclusas Pospanamax.



Esclusas Pospanamax de tres niveles con tinas de reutilización de agua y sistema de llenado por el muro / vaciado por el piso; buque en la cámara de la esclusa; esclusaje ascendente; situación antes y después del llenado

3.3 Conclusiones de las medidas de mitigación y recomendaciones

3.3.1 Conclusiones

En las secciones anteriores se han analizado varias medidas para mitigar la intromisión de agua salada. La mayor parte de estas medidas o sistemas han sido aplicadas a las esclusas existentes / o probadas en condiciones de laboratorio. Hablando en términos generales, la mitigación de la intromisión de agua salada es un asunto delicado. Los resultados de las medidas dependen



sobremanera de la operación cuidadosa de las esclusas, las condiciones hidráulicas prevalecientes, las intensidades de navegación, etc.

Las condiciones hidráulicas en el Canal de Panamá son favorables en el sentido que el nivel de agua del Canal es siempre mucho más alto que el nivel de agua del mar, lo que es contrario, por ejemplo, a las esclusas ubicadas en los deltas de los Países Bajos (Holanda), donde el nivel del mar puede ser más alto o más bajo que el nivel de agua del canal. Un factor que dificulta las medidas de mitigación de la intromisión de agua salada es, sin embargo, la amplitud de las mareas en el lado Pacífico del Canal.

En todo caso, los sistemas de mitigación existentes, los cuales han demostrado ser efectivos, simplemente no pueden aplicarse a las esclusas Pospanamax. Cada medida requiere de un estudio exhaustivo sobre la efectividad bajo las condiciones existentes en el Canal de Panamá. Este estudio puede hacerse en parte mediante simulaciones numéricas, pero la mayoría de las medidas necesitan una simulación y una verificación en modelos de físicos a escala. Se requiere dar especial atención a la situación y problemas de las incrustaciones marinas, de ser pertinentes en el área del Canal de Panamá, ya que representan un peligro para el funcionamiento adecuado de algunas de las medidas de mitigación.

En vista de una selección de medidas de mitigación bien balanceada, es necesario que se conozca la carga de agua salada máxima permitida en el lago Gatún a través de las esclusas. Esta salinidad debe ser evaluada sobre la base de los niveles máximos de concentración en áreas sensitivas del lago Gatún. Por lo tanto, se deben definir los niveles máximos de concentración de sal en el lago Gatún. La relación entre la carga de agua salada a través de las esclusas y los niveles de concentración de sal en áreas específicas puede establecerse mediante el uso de un modelo tridimensional de flujo numérico del lago. Esta relación se requiere en función de la intensidad de tráfico de buques y las variaciones hidráulicas estacionales, para las diferentes configuraciones de esclusas Pospanamax. La configuración de las esclusas Pospanamax es de gran importancia ya que la cantidad de agua que se pierde a través de la operación de las esclusas está relacionada con el diseño de las esclusas.

Aparte del análisis de la salinidad máxima permitida, ya se puede hacer la primera selección de medidas de mitigación que sean factibles y efectivas. Estas medidas se deben elaborar a un nivel inicial de diseño global y su efectividad debe ser estudiada con mayor profundidad.

Las medidas de mitigación prometedoras y altamente efectivas son:

- *Medida C1* (mantener el agua salada en la cámara de la esclusa): esta medida es apropiada para las esclusas de un solo nivel; no ocasiona una pérdida adicional de agua del lago, pero tiene la desventaja de que la operación de las esclusas es bastante compleja; la medida también alarga el período de tiempo de la operación de las esclusas, pero cuando se compara con el tiempo total de operación de las esclusas de 3 niveles, esta puede ser una medida aceptable.
- *Medida C2* (remover parcialmente el agua salada de la cámara de la esclusa inferior): esta medida es apropiada para las esclusas de 3 niveles y para las esclusas de 2 niveles; ocasiona una considerable pérdida adicional de agua dulce (a no ser que se apliquen tinas de reutilización de agua separadas, lo que, sin embargo, reduce la efectividad); la operación de las esclusas es aún más compleja que con la medida *C1* y alarga el período



de tiempo de la operación de las esclusas, razón por la cual se retrasa el manejo de los buques.

- *Medida C3* (recoger el agua salada que se introduce en un pozo profundo y descargar): esta medida es apropiada para todas las configuraciones de esclusas, pero ocasiona una considerable pérdida adicional de agua (la pérdida de agua es menor cuando al pozo se le construye un piso perforado, lo que limita el escape de agua dulce).

Las barreras neumáticas (filtros de burbujas de aire) son menos efectivas, pero se pueden usar conjuntamente con otras medidas para aumentar su efectividad.

3.3.2 Recomendaciones

Para resolver el problema de una intromisión muy alta de agua salada en el lago Gatún, recomendamos lo siguiente:

1. Definir los niveles aceptables de concentración de sal en áreas específicas en el lago Gatún.
2. Evaluar la carga máxima permitida de agua salada que penetra en el lago Gatún a través de las esclusas existentes y las esclusas Pospanamax. La relación entre la carga de agua salada que penetra a través de las esclusas y los niveles de concentración de sal en áreas específicas en el lago Gatún se pueden establecer mediante la utilización de un modelo de flujo numérico tridimensional del lago. Esta relación se requiere en función de la intensidad de tráfico de buques y las variaciones hidráulicas estacionales, para diferentes configuraciones de esclusas Pospanamax.
3. Seleccionar medidas prometedoras y factibles para mitigar la intromisión de agua salada y elaborar estas medidas a un nivel inicial de diseño global, apropiado para las configuraciones específicas de esclusas Pospanamax.
4. Estimar la efectividad de estas medidas en las condiciones actuales del Canal de Panamá.
5. Hacer simulaciones por un mayor período de tiempo del proceso de mitigación de la intromisión de agua salada, para evaluar la efectividad de las medidas seleccionadas bajo variaciones hidráulicas estacionales, con diferentes intensidades de tráfico de buques y para las configuraciones específicas de esclusas Pospanamax, y compararlas con la salinidad permitida. Para este propósito se puede utilizar el modelo Swinlocks de simulación.
6. Evaluar la efectividad de las medidas seleccionadas en relación a la pérdida de agua del lago, período de tiempo de los esclusajes, obstáculos a la navegación, y costo, para las diferentes configuraciones de esclusas Pospanamax.
7. Tomar una decisión sobre las medidas de mitigación de sal y seleccionar una configuración de esclusas Pospanamax; elaborar la medida o grupo de medidas apropiadas a un nivel de diseño conceptual.
8. Estudiar exhaustivamente las condiciones operacionales, mediante computaciones numéricas y estudios de modelos físicos a escala.
9. Desarrollar el diseño final conjuntamente con la configuración seleccionada de esclusas Pospanamax.
10. Verificar la intromisión de agua salada en el diseño final durante un mayor período de tiempo en función de la intensidad de tráfico de buques y las variaciones hidráulicas estacionales.



Las actividades antes mencionadas se reflejan en el cuadro que se presenta a continuación:

