



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



**ESTUDIOS Y DISEÑOS DEFINITIVOS PARA CONSTRUCCIÓN DE
LAS OBRAS DEL PLAN DE MANEJO HIDROSEDIMENTOLÓGICO
Y AMBIENTAL DEL SISTEMA DEL CANAL DEL DIQUE**

SISTEMA OPERATIVO DE CONTROL HIDRÁULICO

CD.ID.330.HID.INF.00.001

BOGOTÁ, FEBRERO DE 2017



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



CD.ID.330.HID.INF.00.001

FEBRERO DE 2017



CONTROL DE REVISIONES		
REV	FECHA (dd-mm-aaaa)	DESCRIPCIÓN
0	23-02-2017	Emision Final

Elaboró: Tjeerd Driessen, Harm Nomden Cargo: Especialistas de Modelación Matemática	Revisó: Peter van de Kreeke Cargo: Director de Diseños	Aprobó: Fortunato Carvajal Cargo: Director de Proyecto
Firma: 	Firma: 	Firma: 



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....	5
2.1	Objetos	5
2.2	Especificación de los requerimientos	5
3	ESTRUCTURAS DE CONTROL DE AGUA	8
3.1	Descripción del sistema	8
3.2	Complejo Calamar	11
3.3	Compuertas de entrada y salida de flujo para el subsistema del Dique Viejo	14
3.4	Compuerta de entrada y salida de flujo para la ciénaga Hobo	15
3.5	Compuertas de entrada y salida de flujo para el reservorio Guájaro.....	16
3.6	Esclusa en Puerto Badel.....	18
4	SISTEMAS DE MONITOREO	20
4.1	Sistema del Canal del Dique.....	20
4.2	Sistema del Río Magdalena	22
5	DISEÑO DEL SISTEMA SCADA	25
5.1	Operación de las estructuras de control de agua	25
5.2	Preparación SCADA.....	28



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



5.3	Río Magdalena.....	31
5.3.1	Régimen de flujo	31
5.3.2	Nivel del umbral en Calamar	37
5.3.3	Pronóstico.....	40
5.3.4	Concentración de sedimentos suspendidos de la ola de inundación	40
5.3.5	Velocidad operativa de las compuertas de Calamar	42
5.4	Control operativo de las compuertas de Calamar	46
5.4.1	Ajuste de compuerta	48
5.4.2	Flujo base.....	55
5.4.3	Procedimiento de lavado: control de inicio	59
5.4.4	Procedimiento de lavado: abrir para el lavado	62
5.4.5	Procedimiento de lavado: verificación provisional.....	65
5.4.6	Procedimiento de lavado: cerrado para el flujo base.....	69
5.5	Control operativo del pasaje de peces	72
5.6	Control operativo de las compuertas de El Porvenir.....	74
5.7	Control operativo de las compuertas de Villa Rosa	77
5.8	Control operativo de las estructuras de entrada y salida en Dique Viejo	79
5.9	Control operativo de la estructura combinada de entrada/salida en ciénaga Hobo (B1).....	81
5.10	Control operativo de la esclusa en Puerto Badel.....	83



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



5.11	Visión general del control operativo para las estructuras dentro del sistema CDD	88
6	DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES	90
6.1	Soporte de Decisiones	90
6.2	Pronóstico	91
6.2.1	FEWS Colombia	92
6.2.2	Modelos de regresión multi lineal	94
6.2.3	Correcciones	98
6.3	Arquitectura del sistema	102
6.3.1	Especificaciones funcionales	102
6.3.2	Especificaciones técnicas	102
6.3.3	Especificaciones del hardware	105
7	REFERENCIAS	109
7.1	Concepto	2
7.2	Datos de entrada	3
7.3	Modelos de regresión	5
7.4	Pronóstico probabilístico	10
7.5	Resultados	12



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Visión general de los componentes del Sistema de control operativo del Sistema CDD	3
Figura 2. Área del Proyecto incluyendo los diferentes complejos de ciénagas.....	9
Figura 3. Esquemmatización de la alternativa preferida con las dos estructuras principales de control a Calamar y Puerto Badel, una indicación de la reducción de la entrada / salida de flujo y patrones del flujo durante condiciones de flujo alto.	11
Figura 4. Dibujo de las estructuras hidráulicas alrededor del KM3.200 (Calamar) incluyendo un bypass con 3 compuertas de 20metros de ancho y una esclusa para un barco de diseño de 223x32m. El Río Magdalena está en el lado izquierdo, el agua fluye a la derecha.	12
Figura 5. Fluctuaciones del nivel de agua justo aguas abajo de las compuertas en Calamar en un año ejemplo: El rojo muestra la situación actual y el azul muestra los niveles de agua controlados y limitados durante el año.	13
Figura 6. Esquema del panorama general de la reconstrucción de las ciénagas en el área del Dique Viejo y un ejemplo de alcantarillas de cajón con la compuerta que será reconstruida	15
Figura 7. Panorama general de la ciénaga Hobo con la ubicación de entrada/salida (Google Earth, 2014)	16
Figura 8. Ciénaga Guájaro y compuertas El Porvenir (aguas arriba, derecha) y Villa Rosa (aguas abajo, izquierda) (Google Earth, 2014)	17
Figura 9. Compuertas Guájaro: El Porvenir (aguas arriba) y Villa Rosa (aguas abajo)	18



Figura 10. Dibujo de las estructuras hidráulicas alrededor del KM095 (Puerto Badel) incluyendo un Sistema de esclusas para un barco de diseño de 223x32m. El agua fluye a la derecha. 19

Figura 11. Ubicaciones de las estaciones automáticas existentes del Consorcio Dique 21

Figura 12. Panorama general de las estaciones de medición en tiempo real aguas arriba de Calamar como parte de FEWS-Colombia 23

Figura 13. Panorama de los PLC en la configuración SCADA del sistema operacional del Canal del Dique (ver también anexo 1) 30

Figura 14. Estaciones de mediciones en la cuenca del Río Magdalena y el sistema Canal del Dique y las compuertas (menoras) de control en todo el sistema 31

Figura 14. Diagrama de caja de las estadísticas mensuales de los niveles de agua en Calamar para el período 1985 a 2014 32

Figura 15. Niveles objetivos mínimos (verde) y máximos (azul) para el reservorio Guájaro conforme al régimen de control CRA 35

Figura 16. Ejemplo de Pronóstico de Consenso Probabilístico ENSO (Consensus Probabilistic ENSO Forecast) para marzo 2016 (Fuente: Columbia University)..... 37

Figura 17. Relación del nivel de agua entre El Porvenir y Calamar..... 39

Figura 18. Variación estacional de descarga y concentración de sedimentos en Calamar. Todos los datos disponibles fueron promediados para establecer los valores promedio mensuales. Se observa que los valores para mayo y julio están ausentes, debido a que no hay dato alguno disponible para estos meses (Consortio Dique, 2015a). 42

Figura 19 Relación entre el nivel de agua en Calamar y la duración para que la compuerta se abra (curva izquierda) o cierre (curva derecha) en días y horas 45



Figura 20 Visión esquemática del control de agua de las compuertas de Calamar 47

Figura 21 Relación entre el nivel de agua y la descarga justo aguas abajo de las compuertas de Calamar 51

Figura 22. Diagrama de flujo del procedimiento de “Ajuste de Compuerta” para las compuertas de Calamar 54

Figura 23. Panorama de los componentes de las compuertas de Calamar 55

Figura 24. Diagrama de flujo para la operación de flujo base de las compuertas de Calamar y la verificación de inicio para la apertura de las compuertas 62

Figura 25. Diagrama de flujo para la apertura adicional de las compuertas de Calamar para el lavado 65

Figura 26. Diagrama de flujo de la verificación provisional durante la apertura de las compuertas de Calamar para el lavado..... 69

Figura 27. Diagrama de flujo para el cierre adicional de las compuertas de Calamar para el flujo base 72

Figura 28. Diseño del paso de peces de Calamar 74

Figura 29. Diagrama de flujo de las normas de control operativo de las compuertas de El Porvenir 76

Figura 30. Diagrama de flujo de las normas de control operativo de las compuertas de Villa Rosa..... 78

Figura 31. Diagrama de flujo de las reglas de control operativo para la estructura de entrada del complejo Dique Viejo (obra A1) 80

Figura 32. Diagrama de flujo de las reglas de control operativo para la estructura de salida del complejo Dique Viejo (obra A8) 81



Figura 33. Diagrama de flujo de las reglas de control de operación de la estructura combinada flujo de entrada/salida en ciénaga Hobo..... 83

Figura 34. Configuración de la esclusa con la compuerta aguas arriba cerrada al principio del período de transición..... 85

Figura 35 Configuración de la esclusa con dos compuertas cerradas..... 86

Figura 36. Estaciones usadas de nivel de agua para los modelos de regresión lineal múltiple 95

Figura 37. Línea temporal de modelos de regresión, el área azul se usa como input para el modelo de regresión; el rojo son diferentes variables de salida para modelos consecutivos..... 95

Figura 38. Ejemplo de niveles de agua pronosticados para 10 días usando la regresión lineal múltiple y regresión cuantílica 97

Figura 39. Efecto de remanso en el Río Magdalena de los niveles del pre-proyecto en relación a la afluencia controlada 100

Figura 40. Efecto de remando en el Río Magdalena de la configuración de compuerta abierta en relación a los niveles de agua del pre-proyecto. . 100

Figura 41. Efecto de remanso en el Río Magdalena de la afluencia controlada en relación a los niveles de agua del pre-proyecto 101

Figura 42. Esquema de un sistema típico de advertencia temprana de inundación..... 106

Figura 43: Línea temporal de los modelos de regresión, el área azul se usa como información para el modelo de regresión; el rojo son diferentes variables de output para modelos consecutivos. 3

Figura 44: Estaciones limnimétricas utilizadas para los modelos de regresión multilíneal 5

Figura 45: Resultados de regresión para el horizontal temporal de pronóstico T+1 sobre los datos de calibración 7



Figura 46: Resultados de validación para el horizonte temporal de
previsión T+1 8

Figura 47: Ejemplo de regresión cuantil para el modelo T+4 a la izquierda
e impuesto en los residuales a la derecha. 12

Figura 48: Ejemplo de pronóstico de nivel de agua con T0 en noviembre
10 del 2005 13

Figura 49: Ejemplo pronóstico nivel de agua con T0 el 1ro de abril, 2002 14

Figura 50: Ejemplo pronóstico nivel de agua con T0 el 4 de septiembre,
1996..... 15

Figura 51: Ejemplo pronóstico nivel de agua con T0 el 9 de octubre, 2007 16



LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Panorama general de las estaciones de medición en tiempo real aguas arriba de Calamar como parte de FEWS-Colombia	24
Tabla 2. Panorama general del tipo de control de agua propuesto para todas las estructuras de control de agua.....	26
Tabla 3. Nivel de agua promedio mensual en 30 años en Calamar	33
Tabla 4: Procedimiento para calcular las nuevas alturas de compuerta individuales basadas en el área de apertura total.....	53
Tabla 4: Capacidad de esclusado de la esclusa Puerto Badel	87
Tabla 5. Visión general de las normas de control operativo	89
Tabla 6. Resultados de calibración y validación para los 10 modelos de predicción.....	96
Tabla 7: Resumen de resultados de regresión para los diez modelos	10
Tabla 8: Coeficientes de regresión cuantil para varios percentiles para cada modelo	17
Tabla 9: Coeficientes de regresión modelo T+1	18
Tabla 10: Coeficientes de regresión modelo T+2	19
Tabla 11: Coeficientes de regresión modelo T+3	20
Tabla 12: Coeficientes de regresión modelo T+4	21
Tabla 13: Coeficientes de regresión modelo T+5	22
Tabla 14: Coeficientes de regresión modelo T+6	23
Tabla 15: Coeficientes de regresión modelo T+7	24



Tabla 16: Coeficientes de regresión modelo T+8 25

Tabla 17: Coeficientes de regresión modelo T+9 26

Tabla 18: Coeficientes de regresión modelo T+10..... 27



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



1 Introducción

La restauración del Canal del Dique (CDD) tiene como objetivo resolver varios problemas que suceden actualmente en el sistema hídrico. Los problemas son producto de desarrollos sociales en el sistema así como desarrollos que se relacionan con el Canal. Los objetivos del Proyecto abarcan la navegación, ciénagas, reservorios de agua, ecología de agua dulce, abastecimiento de agua, sedimentación de la Bahía de Cartagena y Barbacoas y el impacto del Canal en los arrecifes de coral. En la práctica, estos objetivos se deben lograr controlando el sistema de agua del Canal Del Dique de una manera específica. Se construirán algunas estructuras de control para controlar el agua lo mejor posible.

El propósito de este Sistema es proveer un control general balanceado de los niveles de agua y caudales en el Canal del Dique y en las ciénagas conectadas, de tal manera que haya suficiente agua en todo momento para el abastecimiento de agua bebible y la navegación, se mantiene el ciclo natural de inundación de las ciénagas y se reduce el flujo de sedimentos a las Bahías mientras que los niveles altos de agua durante las condiciones de inundación extrema en el Río Magdalena se mantienen fuera del Canal para proveer seguridad contra inundaciones. En el documento 'Selección de la alternativa preferida' se puede encontrar una historia completa de estos desafíos y una evaluación acerca de la manera en que la alternativa preferida aborda dichos desafíos.

El presente documento describe el diseño detallado del Sistema de control que será implementado por el proyecto. Se utiliza la descripción en los Términos de Referencia (TOR) como punto de referencia y agrega detalles al informe de diseño básico tal como lo describe el Consorcio Dique (2016a). Este documento usa las secciones TOR 3.5.2. y 3.6 para este propósito. Estas secciones TOR describen parcialmente los requerimientos que se deben cumplir. En el Capítulo 2 se considerarán los requerimientos de diseño.

3.5.2. Manual de operación y mantenimiento



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



El consultor preparará un manual de operación y mantenimiento del Proyecto que incluya tanto las obras civiles como los equipos electromecánicos. Este manual resumirá las características técnicas y procedimentales requeridas para la operación y mantenimiento del Proyecto, hará referencia a la instrumentación instalada y a los valores esperados de la misma de acuerdo con los criterios y consideraciones de diseño de las obras, y relacionará todos los documentos requeridos para ese propósito como planos de referencia y documentos del consultor, fabricantes de equipos y otros.

3.6. Sistema de operación centralizada del Sistema Canal del Dique

El consultor deberá elaborar los diseños detallados del sistema de supervisión, control y operación manual, automática, remota, inasistida y centralizada del sistema del Canal del Dique, y diseñará a partir del modelo hidrosedimentológico utilizado en la Etapa 1, el software necesario para operar en tiempo real el sistema del Canal del Dique. El diseño elaborado por EL CONSULTOR debe atender a una política de operación óptima, en la que se definan los límites de niveles y caudales máximos y mínimos que deben mantenerse durante la operación del Canal del Dique y las ciénagas en las diversas épocas del año. La toma de decisión diaria de operación deberá realizarse mediante diversos modelos probabilísticas entrelazados que permitan realizar un número suficiente de simulaciones para un escenario de mediano plazo, (por ejemplo 3 meses) La simulación que satisfaga la política de operación en el escenario de mediano plazo, con un nivel de probabilidad de cumplimiento del 95%, será la que se adopte para tomar la decisión de operación del día de la simulación.

El Sistema de control operativo del Sistema CDD consiste en varios componentes, los cuales se muestran en la Figura 1. El Sistema de monitoreo y las estructuras de control de agua son componentes en los cuales se sitúa el input y el output del sistema de control, respectivamente. El sistema SCADA es el Sistema centralizado que trata

con los diferentes flujos de datos. Obtiene datos de telemetría del Sistema CDD y obtiene información de predicción del Sistema de Soporte de Decisiones (DSS). Según la información entrante y las normas operativas programadas, el Sistema SCADA habilita alertas para la operación (automática) de las estructuras de control de agua. El DSS es un Sistema paralelo al Sistema SCADA que supporta la toma de decisiones durante un evento de descarga. El DSS también puede importar fuentes de datos externos (por ejemplo, pronósticos externos) para usarlos como información para el proceso de toma de decisiones. Los sistemas SCADA y DSS están interconectados e intercambian datos. Estos dos sistemas son el corazón del Sistema de control operacional.

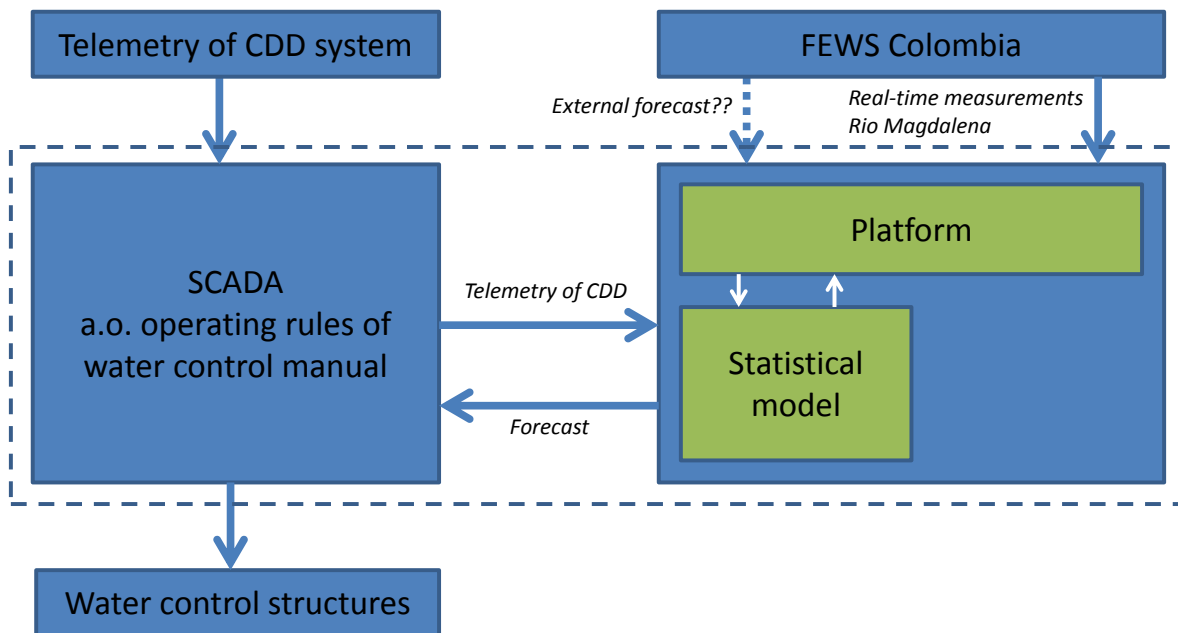


Figura 1. Visión general de los componentes del Sistema de control operacional del Sistema CDD

El presente documento describe el diseño detallado del Sistema de control operacional del Canal del Dique. Describe los requerimientos funcionales de este Sistema (Capítulo 2) y brinda una visión general de las estructuras de control de agua (Capítulo 3), los sistemas de monitoreo (Capítulo 4) y el diseño del sistema SCADA (Capítulo 5). El diseño detallado del Sistema SCADA se describe en la Nota Técnica del

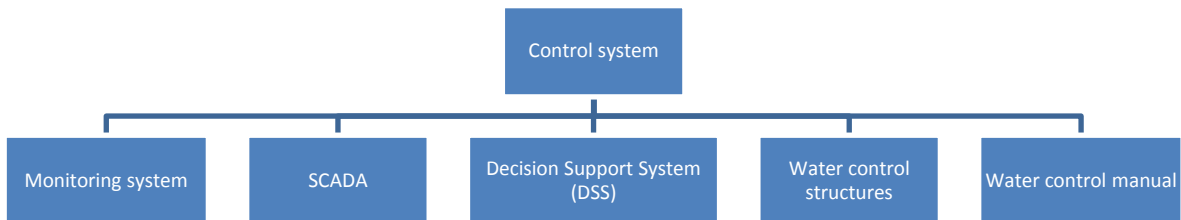


Diseño Final: Esclusa SCADA y dique eléctrico Calamar y esclusa Puerto Badel (Consortio Dique (2016b) y se describe de manera general en este informe. El presente documento reporta el diseño detallado del Sistema de Soporte de Decisiones (DSS) (Capítulo 6).



2 Requerimientos de diseño

2.1 Objetos



2.2 Especificación de los requerimientos

1. Sistema de Monitoreo
 - 1.1. Se requieren mediciones de los niveles de agua y configuraciones estructurales como información para el sistema de control operacional
 - 1.2. Estas mediciones se deben realizar automáticamente. Debe haber posibilidad de realizar la medición manualmente en caso de que el limnómetro/sensor automático esté defectuoso.
 - 1.3. Es necesario poder enviar las lecturas automatizadas del nivel de agua y las estructuras a SCADA en el Centro de Control

2. SCADA
 - 2.1. El SCADA debe tener la capacidad de importar datos de telemetría
 - 2.2. El SCADA debe tener la capacidad de intercambiar información con un DSS
 - 2.3. El SCADA debe tener la capacidad de evaluar las mediciones en tiempo real con normas de control incorporadas
 - 2.4. El SCADA debe tener la capacidad de operar automáticamente las estructuras de control de agua en base a esta evaluación entre determinados niveles de agua mínimos y máximos.



3. Sistema de Soporte de Decisiones (DSS)

3.1. Objetivos de control

- 3.1.1. El DSS debe ser un Sistema automatizado
- 3.1.2. El DSS debe tener la capacidad de intercambiar información (telemetría o DSS) con el sistema SCADA
- 3.1.3. El DSS debe usar un pronóstico sobre el cual basar sus decisiones
- 3.1.4. El DSS permite que el pronóstico sea importado externamente y/o producido por el DSS
- 3.1.5. El DSS debe ser un Sistema que analiza y provee información para la toma de decisiones desde una ubicación centralizada y remota (centro de control)
- 3.1.6. El DSS debe tener la capacidad de avisar a SCADA sin asistencia humana
- 3.1.7. El DSS debe tener la capacidad de funciones en línea así como en modo fuera de línea.

3.2. Requerimientos no funcionales

- 3.2.1. El DSS debe ser escalable, de modo que los avances futuros puedan ser incorporados fácilmente
- 3.2.2. El DSS debe estar disponibles las 24 horas del día y tener una disponibilidad garantizada al Sistema de al menos 97%
- 3.2.3. El DSS debe ejecutarse rápidamente. Una corrida del modelo (pronóstico) no debe ser mayor a 5 minutos.
- 3.2.4. El software usado debe ser robusto, confiable y bien probado
- 3.2.5. La complejidad del DSS debe coincidir con las herramientas existentes, con el valor agregado que esta complejidad provee y las cualificaciones del personal disponible que monitorea y opera el sistema CDD



3.2.6. El DSS debe ser seguro y no ser vulnerable a influencias externas, o maliciosas.

4. Estructuras de Control de Agua

- 4.1. Todas las compuertas deben tener la capacidad de ser operadas manualmente en caso falle la operación automatizada
- 4.2. Las estructuras de las compuertas que están controladas deben ser controladas desde el Sistema SCADA en el Centro de Control Center a menos que se indique lo contrario. En el caso de realizarse un control local (manual), el sistema SCADA debe proporcionar un asesoramiento sobre los ajustes que deben utilizarse.

5. Manual de control de agua

- 5.1. Todas las estructuras controladas deben estar incluidas en el manual de control de agua
- 5.2. El manual de control de agua debe estar claramente definido y no debe dar pie a interpretación alguna por parte del lector
- 5.3. El manual de control de agua incluye las obras civiles y el equipo electromecánico
- 5.4. El manual describe como mínimo las actividades técnicas y de procedimiento requeridas para la operación y mantenimiento.
- 5.5. El manual de control de agua no puede tener actividades en conflicto.
- 5.6. Todas las actividades descritas en el manual de control de agua deben ser factibles en términos de practicidad, conocimiento, tiempo, presupuesto y complejidad.
- 5.7. El manual de control de agua debe incluir los criterios de operación los cuales deben estar de conformidad con el diseño de las estructuras.



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



3 Estructuras de control de agua

El Sistema del Canal del Dique se controla usando diferentes estructuras de control de agua. Algunas estructuras ya existen, mientras que otras deben ser construidas. No todas las estructuras de control de agua desempeñan un papel activo en el control operacional. La mayoría son fijas como las presas y los diques (o conexiones nuevas con un nivel de entrada fijo). Otras desempeñan un papel vital en el control y operación de los niveles de agua y descargas y deben ser ajustadas en el tiempo, oscilando entre cada hora y cada día a varias veces durante un año. Este estudio y este capítulo se centran en estas últimas estructuras de control de agua que serán operadas de manera activa como parte del control.

3.1 Descripción del sistema

El Sistema del Canal del Dique consiste en el Canal en sí desde la bifurcación del Río Magdalena (en Calamar) hasta Pasacaballos (Bahía de Cartagena). En ambos lados del Canal se ubican varios complejos de ciénagas. Estos complejos de ciénagas (ver Figura 1) tienen diferentes características oscilando de pantanos elásticos totalmente naturales a cuerpos de agua totalmente controlados (reservorio Guájaro), ciénagas aisladas hasta ciénagas continuamente conectadas al Canal, las ciénagas conectadas únicamente a través de caños hasta ciénagas conectadas únicamente durante los períodos de inundación alta a través del desbordamiento (el área delta). Se definen los siguientes complejos de ciénagas:

- Complejo A (verde oscuro): Dique Viejo
- Complejo B (verde): Ciénagas Hobo & Rabón
- Complejo C (verde claro): reservorio Guájaro
- Complejo D (amarillo): Ciénagas Capote/Tupe/Zarzal-Matuya-María La Baja
- Complejo E (naranja claro): Ciénagas Luisa-Atascosa-AguasClaras-Cienaguita
- Complejo F (naranja): Ciénaga Juan Gómez & Delta
- Complejo G (rojo): Costa Paricuica

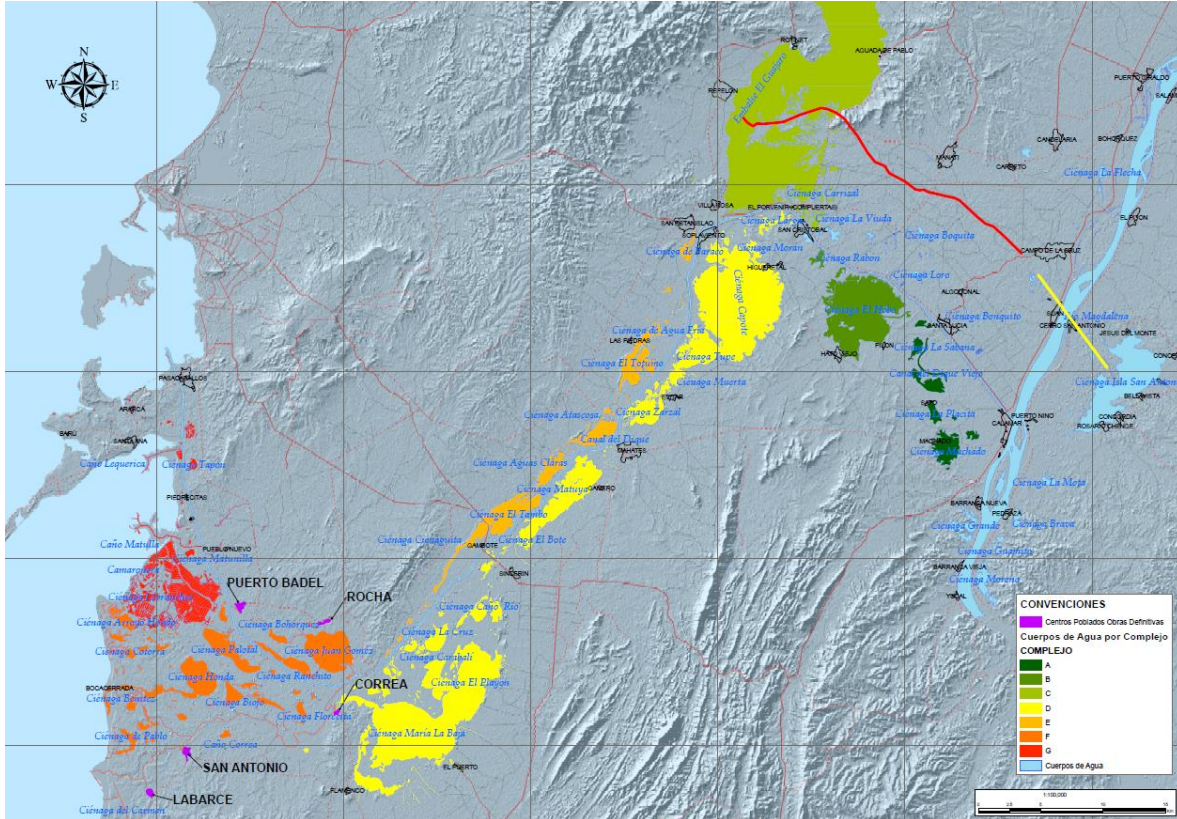


Figura 2. Área del Proyecto incluyendo los diferentes complejos de ciénagas

La Figura 3 muestra una esquematización de la alternativa preferida incluyendo las dos ubicaciones de las estructuras grandes (control) cerca de Calamar (KM3.2) y Puerto Badel (KM95.0). Esta alternativa preferida se basa en los siguientes objetivos:

Reducción: enfocarse en reducir la afluencia en el Sistema y por ende, también, en reducir la salida del flujo en el área costera. La compuerta en Calamar reducirá y controlará la afluencia a un mínimo, pero también ofrecerá la posibilidad de permitir más agua en el sistema, si se requiere. La reducción total de la afluencia de agua y sedimentos en el sistema es casi el 55%. Debido a las diferencias en los niveles de agua en ambos lados de la compuerta, la compuerta está acompañada de esclusas de navegación.



Redistribución: Dirigir el agua dulce y rica en sedimentos a una parte determinada del área costera, en donde ocasionará menos problemas o incluso contribuirá a las funciones del sistema. El cierre del Canal en Puerto Badel incluyendo un dique grande hasta la parte costera evitará que el agua fluya hacia las bahías de Cartagena y Barbacoas y dirigirá toda el agua a la parte sur del sistema costero. En Puerto Badel también se propone una esclusa.

Restauración del Sistema de ciénagas a una condición que favorece la productividad de las ciénagas desde una perspectiva ecológica y humana. Cada complejo de ciénagas tiene su solución específica incluyendo algunas medidas para asegurar o incluso mejorar el funcionamiento ecológico del sistema.

La navegación futura en el Canal del Dique estará asegurada mediante la construcción de las esclusas, un buen control del Sistema y suficiente dragado en los lugares de sedimentación a través de los años.

Si fuese necesario, se tomarán medidas de mitigación para asegurar la protección contra inundaciones, uso de agua dulce o para reducir otros impactos. Si no fuera posible aplicar medidas de mitigación para los impactos negativos, se propondrá una buena forma de compensación.

También es importante: La Figura 3 no muestra conexiones claras con los complejos A, B y C. Las ciénagas del Dique Viejo (A) y las ciénagas Hobo & Rabón (B) están rodeadas de pueblos en tierras inferiores. Estos dos complejos estarán conectados con el Canal, pero la entrada y salida del flujo estarán conectadas por pequeñas compuertas para evitar la inundación de los pueblos aledaños. El Complejo C es el embalse de Guájaro que continuará siendo controlado por las compuertas existentes en El Porvenir (entrada) y Villa Rosa (salida).

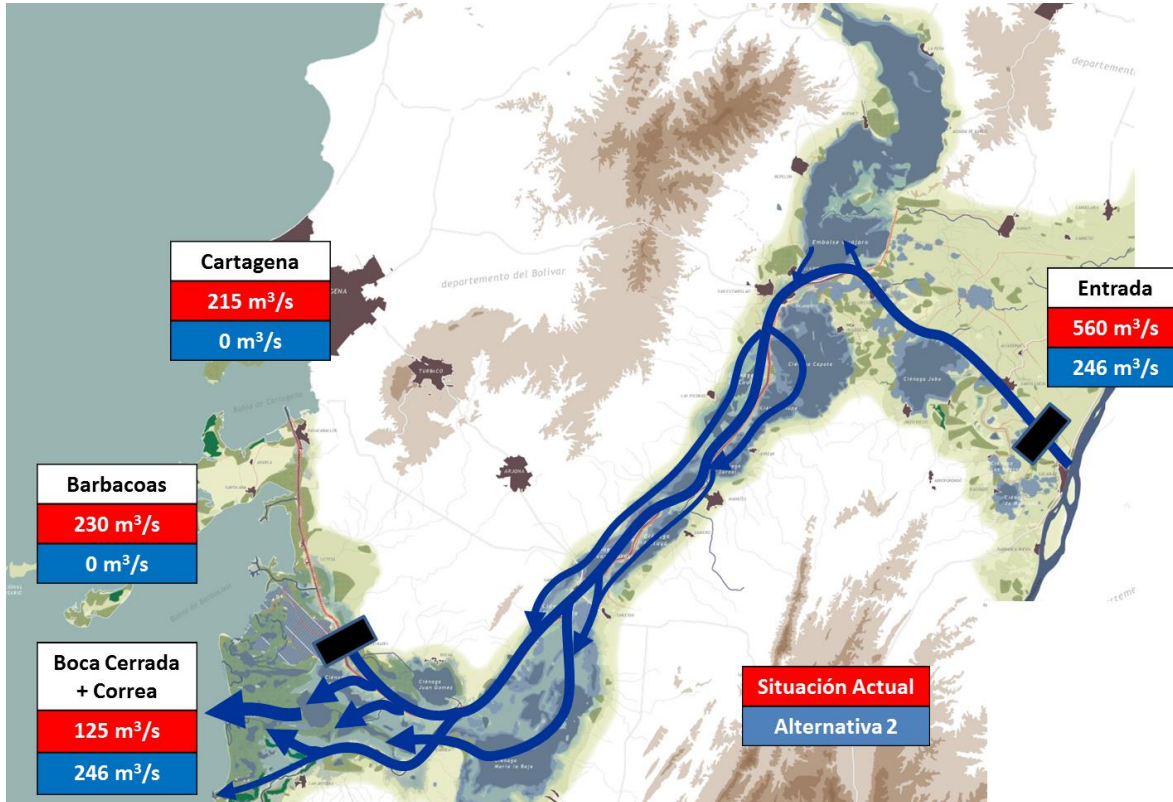


Figura 3. Esquemmatización de la alternativa preferida con las dos estructuras principales de control a Calamar y Puerto Badel, una indicación de la reducción de la entrada / salida de flujo y patrones del flujo durante condiciones de flujo alto.

3.2 Complejo Calamar

En la entrada del Canal del Dique se construirán tres compuertas (KMR3.2) para reducir y controlar la cantidad de afluencia en el Sistema del Canal Del Dique. Las compuertas grandes están acompañadas de una esclusa grande y un pasaje para peces. Las compuertas estarán ubicadas en un bypass paralelo a la estructura de la esclusa en el Canal Del Dique existente. Las tres compuertas consistirán en aperturas de 20 metros de ancho cada una y las tres compuertas serán controladas de manera individual. El nivel del umbral se ubica a -1 msnm (ver Figura 4).

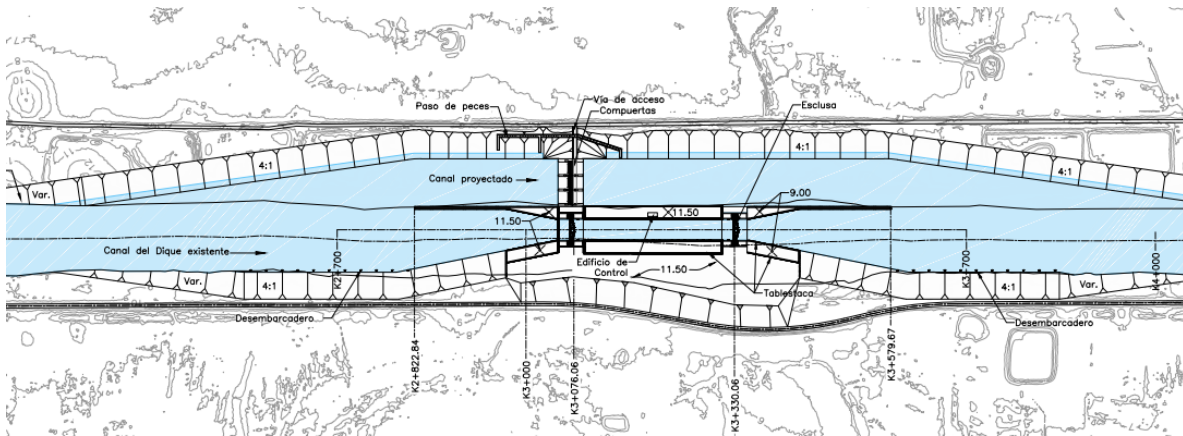


Figura 4. Dibujo de las estructuras hidráulicas alrededor del KM3.200 (Calamar) incluyendo un bypass con 3 compuertas de 20 metros de ancho y una esclusa para un barco de diseño de 223x32m. El Río Magdalena está en el lado izquierdo, el agua fluye a la derecha.

Las compuertas en Calamar se usarán para controlar la afluencia de agua en el Sistema y para controlar los niveles de agua. La Figura 5 muestra los niveles de agua en el Canal (justo aguas abajo de la compuerta) para el año 2005 como ejemplo con (azul) y sin (rojo) la alternativa preferida.

Se muestra claramente que la mayor parte del año la afluencia de agua se reduce hasta un nivel de alrededor de 2.05 msnm directamente aguas debajo de las compuertas de Calamar. Este es el nivel mínimo de agua para la navegación, para lo cual se necesita únicamente una pequeña cantidad de descarga. Cuando sea posible, se permitirán pulsos altos de descarga en el sistema. En los meses de mayo – julio y/o en el fin del año, será necesario un pulso medio alto para llenar el Embalse Guájaro.

Mientras que el nivel de agua del Río Magdalena en Calamar puede subir por encima de un nivel de 9 msnm, el nivel máximo de agua (controlado) justo aguas abajo de la compuerta se sitúa alrededor de 7.0 msnm, correspondiendo con 920 m³/s. El funcionamiento hidráulico del sistema del Canal del Dique ha sido optimizado, pero todo se

maximiza en este nivel del agua máximo aguas debajo de las compuertas Calamar. Una afluencia más alta de agua en el Sistema, que produzca niveles más altos de agua no contribuiría al Sistema y podría incluso acarrear problemas concernientes a la inundación. Conforme a las estadísticas, sería posible permitir estos pulsos altos en el sistema cada 1 o 2 años. En períodos de sequía, como en los años 2013-2015, esto no sería posible.

El Sistema de control necesita ser optimizado de tal manera que el funcionamiento del Embalse Guájaro permanezca igual o incluso mejor. El flujo que atraviesa es controlado mediante el movimiento vertical de la compuerta: si se baja la compuerta, el flujo es restringido.

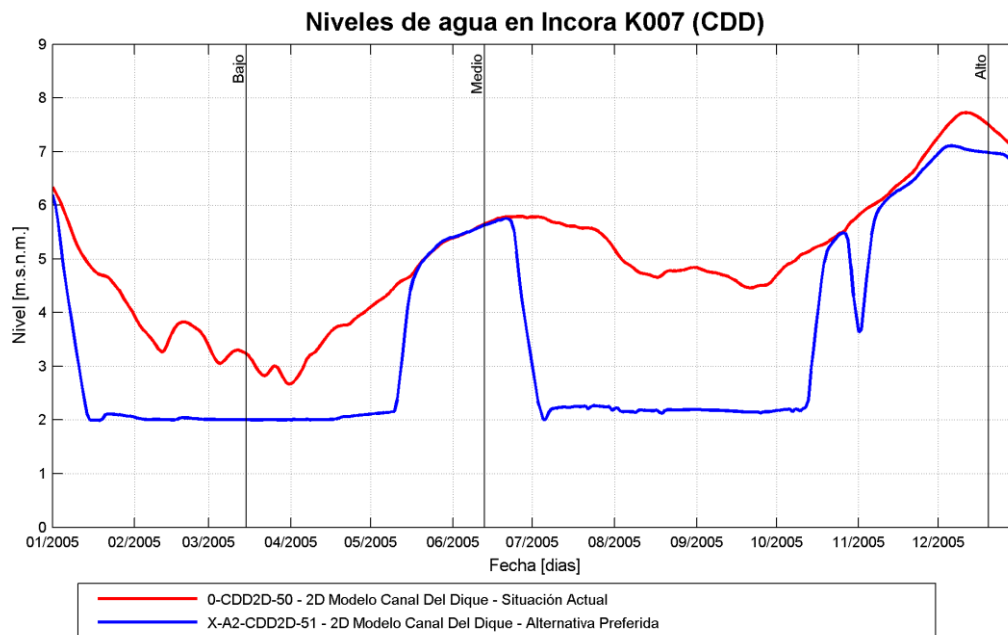


Figura 5. Fluctuaciones del nivel de agua justo aguas abajo de las compuertas en Calamar en un año ejemplo: El rojo muestra la situación actual y el azul muestra los niveles de agua controlados y limitados durante el año.



3.3 Compuertas de entrada y salida de flujo para el subsistema del Dique Viejo

La medida de “reconstrucción del caño Dique Viejo” se refiere específicamente a la restauración de las ciénagas en el área del Dique Viejo (aguas abajo de Calamar en la orilla izquierda del Canal del Dique). Esta área ha sido cerrada tanto en el Canal del Dique como en el Río Magdalena y sufre de insuficiente circulación y niveles bajos de agua. Reconectar el Dique Viejo en esta área produce una posibilidad de mejorar el abastecimiento de agua para dicha área y restaurar la dinámica de las ciénagas como Machado. La Figura 6 muestra el diseño conceptual de la reconstrucción del Dique Viejo. Se ha elegido conectar Dique Viejo aguas arriba y abajo y controlar la entrada y salida del flujo con las compuertas. Dique Viejo está conectado con el Río Magdalena cerca de Barranca Nueva mediante una alcantarilla de cajón. La compuerta permite un flujo inferior a 5 m³/s. Aguas abajo, Dique Viejo se conecta con el Canal del Dique cerca de Santa Lucia (KMR009) usando una compuerta para controlar los niveles de agua y evitar el ingreso de agua en el sistema, cuando los niveles de agua del Canal del Dique suben a niveles altos durante los pulsos.

La estructura de salida de flujo consiste en 2 compuertas x 2.5 metros de ancho seguido de un pasaje para peces. En todo nivel posible de agua en las ciénagas de Dique Viejo la velocidad del flujo a través de las compuertas y el pasaje para peces será lo suficientemente bajo para la migración de peces. El nivel máximo de agua permisible en el Sistema del Dique Viejo, la descarga será de 10m³/s.

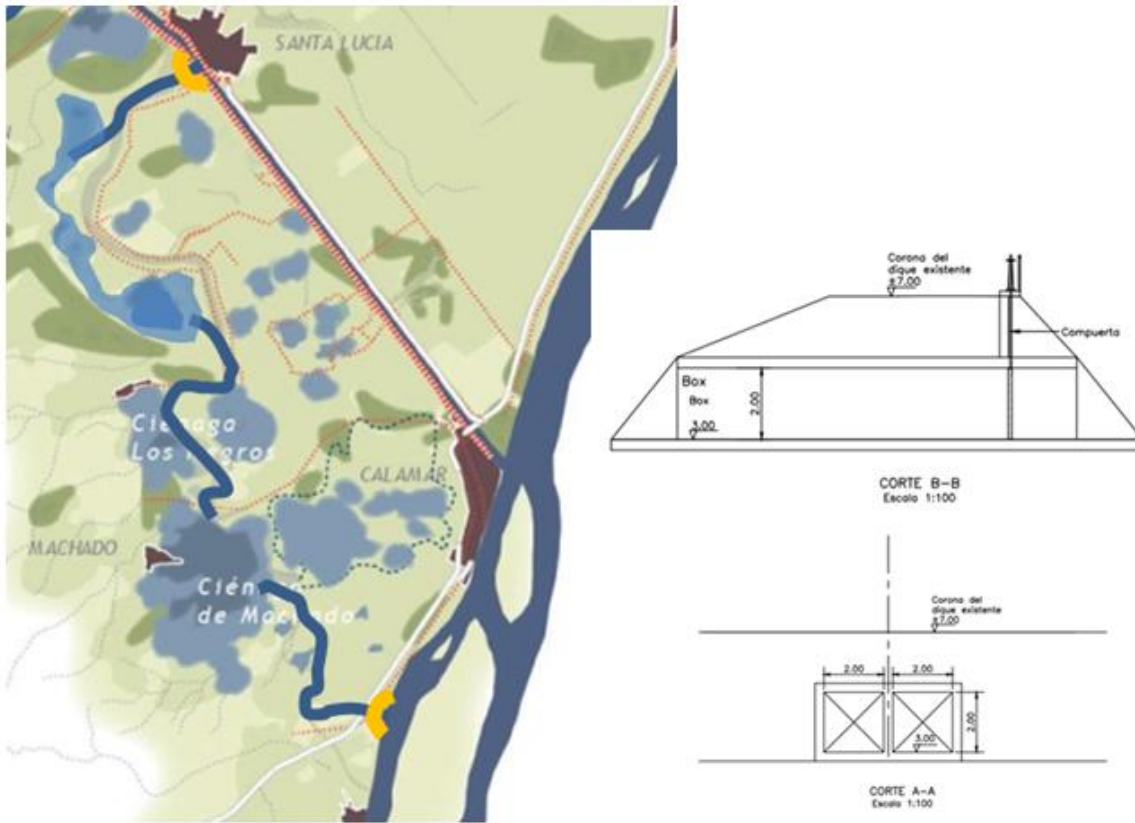


Figura 6. Esquema del panorama general de la reconstrucción de las ciénagas en el área del Dique Viejo y un ejemplo de alcantarillas de cajón con la compuerta que será reconstruida

3.4 Compuerta de entrada y salida de flujo para la ciénaga Hobo

En la situación actual la ciénaga Hobo ya no está conectada con el Canal dado que los dos caños antiguos han sido cerrados. Una conexión abierta con el Canal del Dique para la alternativa preferida resultaría en niveles de agua muy altos y ocasionarían inundación en los pueblos cercanos de Hato Viejo y Pilón. Se planea realizar una conexión con el Canal del Dique, pero con el uso de una compuerta para controlar el flujo de entrada y salida y de los niveles de agua en la ciénaga (ver Figura 7).



Figura 7. Panorama general de la ciénaga Hobo con la ubicación de entrada/salida (Google Earth, 2014)

3.5 Compuertas de entrada y salida de flujo para el reservorio Guájaro

El reservorio Guájaro es un reservorio de agua dulce y es el cuerpo de agua más grande del departamento Atlántico. El reservorio se formó mediante la conexión de varias ciénagas: ciénaga La Peña (parte norte), ciénaga Del Medio (parte central) y ciénaga Guájaro (parte sur). Una gran parte del consume de agua en el Sistema del Canal Del Dique ocurre alrededor del reservorio Guájaro. Este reservorio artificial con un tamaño promedio de 130 km² sirve de abastecimiento de agua para la pesca y las áreas agrícolas alrededor del mismo; y también ocurren actividades de acuicultura. El reservorio está conectado con el Canal Del

Dique a través de dos caños incluyendo dos sistemas grandes de compuertas (ver Figura 8).

La afluencia de agua al reservorio Guájaro tiene lugar a través del complejo de compuertas en El Porvenir (KMR25.4, ver Figura 8 izquierda). Este Sistema de compuertas consiste en 4 compuertas controladas de manera individual con un ancho de 6 metros. El reservorio se vacía a través de las compuertas en Villa Rosa (KMR31.0, ver Figura 9 derecha).

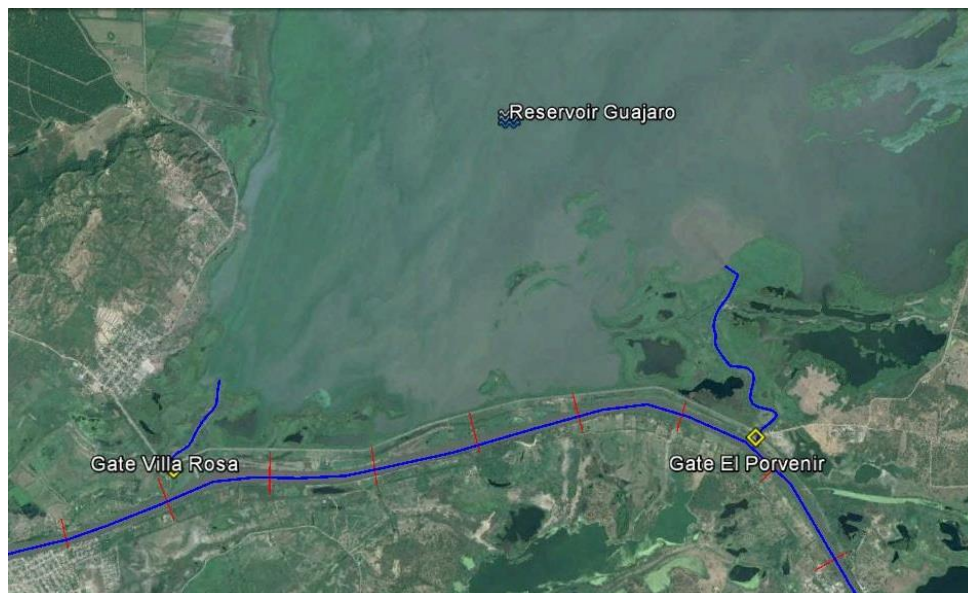


Figura 8. Ciénaga Guájaro y compuertas El Porvenir (aguas arriba, derecha) y Villa Rosa (aguas abajo, izquierda) (Google Earth, 2014)



Figura 9. Compuertas Guájaro: El Porvenir (aguas arriba) y Villa Rosa (aguas abajo)

3.6 Esclusa en Puerto Badel

El actual Canal del Dique será cerrado con una esclusa en Puerto Badel (KM095). Esto evitará que el agua fluya más hacia abajo a las bahías de Cartagena y Barbacoas. En la situación final de la alternativa preferida, no fluirá agua dulce más hacia abajo, con la excepción de la pérdida de agua durante el uso de la esclusa en esta presa para que pasen los barcos. Como opción, será posible permitir algún flujo de agua dulce en la parte aguas abajo del canal durante los flujos pico, con el fin de mejorar el desarrollo de los manglares. Esto significa que toda el agua que sale del Sistema del Canal del Dique fluirá posteriormente a través del caño Correa, los caños a la ciénaga Palotal y como flujo sobre tierra a través del delta hacia el mar.

Desde una perspectiva ecológica, el área (manglar) aguas abajo del Puerto Badel necesita un período de transición para adaptarse lentamente a la salinización. La esclusa (ver Figura 10) debe proveer suficiente flujo de agua dulce durante este período de adaptación para limitar la intrusión salina. Al principio la intrusión salina debe ser únicamente por períodos cortos y durante el período de transición el área total aguas abajo de Puerto Badel se volverá gradualmente más salina.

Cerca de Puerto Badel se cerrará el Canal para evitar el flujo de agua hacia las bahías de Cartagena y Barbacoas. En cambio, toda el agua fluirá a través del área delta hacia el mar. Se construirá una esclusa para el convoy de diseño (LxWxD = 223mx32mx6pies). Para propósitos ecológicos, será necesario permitir, durante el período de transición, una cantidad limitada de agua dulce que fluya aguas abajo de Puerto Badel. Esta descarga se hace posible mediante el uso de la esclusa.

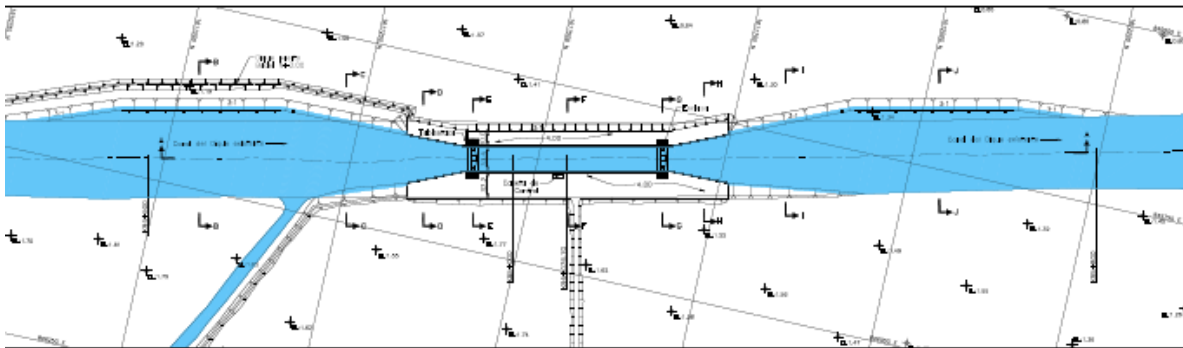


Figura 10. Dibujo de las estructuras hidráulicas alrededor del KM095 (Puerto Badel) incluyendo un Sistema de esclusas para un barco de diseño de 223x32m. El agua fluye a la derecha.

Además, dos pequeños canales de riego traerán agua fresca hacia los pueblos río abajo de Puerto Badel. Aguas arriba de la esclusa de buques, tanto en la orilla derecha como en la orilla izquierda, el agua entrará a estos canales a través de una alcantarilla con compuertas para controlar el flujo de entrada. A través de los pequeños canales el agua fluirá en la orilla derecha en una extensión de 4,5 km hasta el pueblo de Lomas de Matunilla y en la orilla izquierda en 9 km hasta los pueblos El Recreo and Leticia.



4 Sistemas de monitoreo

4.1 Sistema del Canal del Dique

En el sistema del Canal del Dique, el Consorcio Dique ha instalado 16 estaciones (véase Figura 11). Todas están referenciadas por altura (por encima del nivel medio del mar: msnm):

- Una está ubicada a lo largo del Río Magdalena a unos 12 kilómetros aguas arriba de la entrada del Canal del Dique cerca de Barranca Vieja.
- Hay cinco indicadores ubicados a lo largo del Canal del Dique en KMR 18 (San Cristóbal), 25 (Compuertas Guájaro), 52 (Mahates), 82 (Santa Helena) y 109 (Lequerica).
- Nueve están ubicadas en las ciénagas más grandes: Machado, Hobo, reservoir Guájaro, Capote, El Tambo, Matuya, María La Baja, Juan Gomez y Palotal.
- Una se encuentra en la bahía de Cartagena

Las estaciones proporcionan mediciones de nivel de agua en tiempo real de las cuales se corregirán los datos brutos por parte del offset fijo (nivel de referencia) para convertir la medición en msnm. Los datos son accesibles en línea. Los niveles de agua ahora se miden cada hora o 10 minutos (dependiendo de la estación), lo cual es suficiente para cumplir con el objetivo actual de recopilación de datos. Los datos muestran ruido, pero los valores medios diarios son representativos. Si es necesario para el sistema de control, la frecuencia de las mediciones automáticas se puede ajustar fácilmente.

Se recomiendan los siguientes lugares para realizar mediciones automáticas adicionales en tiempo real (para monitoreo):

- Canal Del Dique
 - Mediciones de nivel de agua aguas arriba y aguas abajo de las compuertas de control en el complejo Calamar, lo suficientemente lejos de las compuertas de control para poder tener un nivel de agua estable.
 - Medición del nivel de agua a la salida de Dique Viejo (KMR 9)



- Medición del nivel de agua en la entrada/salida de Hobo (KMR 12)
- Medición del nivel de agua en Villa Rosa (KMR 31)
- Medición del nivel de agua justo aguas arriba de las primeras estructuras grandes de entrada para las ciénagas Capote and Luisa (KM038)
- Medición del nivel de agua arriba y abajo de la compuerta en Puerto Badel (por ejemplo KM094 y KM096)
- **Sistemas de Ciénagas:**
 - Medición del nivel de agua dentro del Dique Viejo

Estas mediciones se pueden utilizar para controlar los niveles de agua en tiempo real y ajustar la configuración de la compuerta cada hora o cada día para cumplir con los niveles de agua deseados. El control del agua se explica con más detalle en los numerales 5.4 a 5.11. El monitoreo del estado ecológico no se realizará en tiempo real.

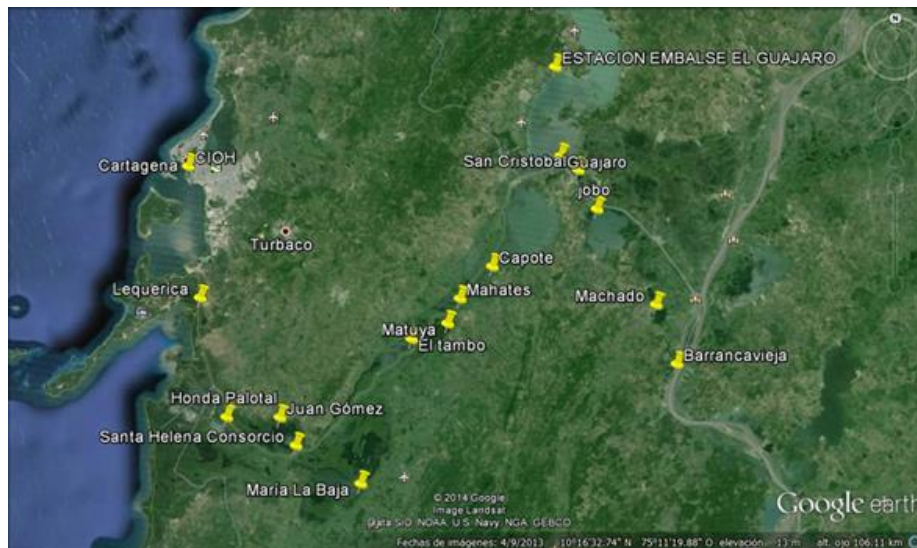


Figura 11. Ubicaciones de las estaciones automáticas existentes del Consorcio Dique



4.2 Sistema del Río Magdalena

Los niveles de agua en el Río Magdalena se miden en muchos lugares aguas arriba de Calamar. La plataforma FEWS Colombia es la plataforma nacional que difunde todas las mediciones del nivel de agua y precipitación en tiempo real (manual y/o automático) al público. La Figura 12 y la Tabla 1 ofrecen un panorama general de las estaciones más relevantes presentes en FEWS-Colombia. Estas estaciones se pueden usar para efectos de predicción (ver párrafo 6.2) para saber el nivel futuro de agua en Calamar. La plataforma FEWS Colombia es un desarrollo en curso que se ha hecho posible por los socios colombianos de IDEAM, CVC, CAR y DNP y los socios holandeses de UNESCO-IHE, Deltares y la Embajada del Reino de Holanda en Colombia. Ellos tienen la ambición de implementar más estaciones de medición en el entorno FEWS (Flood Early Warning System – Sistema de Alerta Rápida de Inundaciones) y están trabajando para incluir modelos hidráulicos e hidrológicos para describir adicionalmente las capturas del Río Magdalena y Cauca.

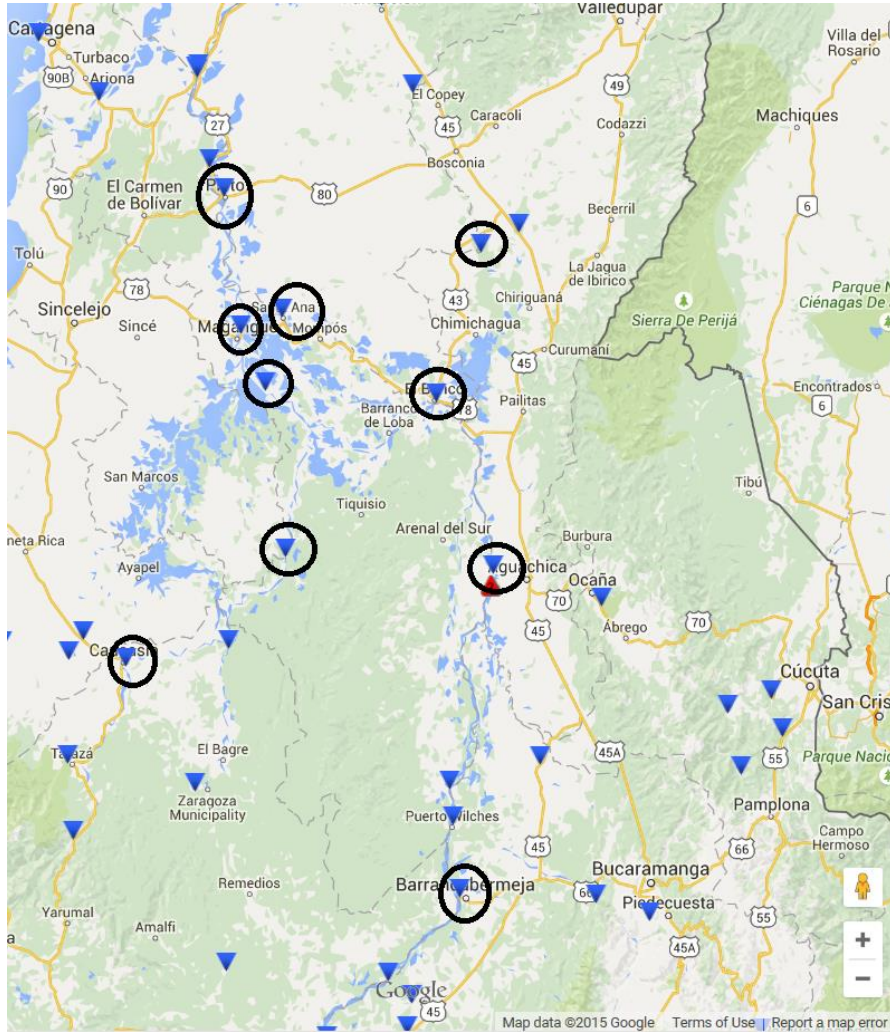


Figura 12. Panorama general de las estaciones de medición en tiempo real aguas arriba de Calamar como parte de FEWS-Colombia

Tabla 1. Panorama general de las estaciones de medición en tiempo real aguas arriba de Calamar como parte de FEWS-Colombia

Nombre	Latitud	Longitud	Tipo de observación	Calibrado r cero	RKM de Calamar
Calamar (29037020)	10°15'13.9"N	74°54'42.1"W	Nivel de agua automatizado (h) y manual (d)	-0.32 m.s.n.m.	0
Plato (25027450)	9°47'18.34"N	74°48'24.17"W	Nivel de agua automatizado (h) y manual (d)	0.04 m.s.n.m.	~68
Magangué- Esperanza (25027680)	9°15'14.5"N	74°44'19.3"W	Nivel de agua manual (d)	9.24 m.s.n.m.	~140
Santa Ana (25027370)	9°19'12.91"N	74°34'28.41"W	Nivel de agua manual (d)	9.68 m.s.n.m.	~139
Barbosa (25027530)	9°2'4.1"N	74°38'39.1"W	Nivel de agua manual (d)	10.42 m.s.n.m.	~169
El Banco (25027020)	8°59'33.1"N	73°58'10"W	Nivel de agua automatizado (h) y manual (d)	19.61 m.s.n.m.	~249
Las Varas (25027200)	8°23'14.7"N	74°33'47.4"W	Nivel de agua automatizado (h) y manual (d)	21.95 m.s.n.m.	~262
Caimancito (25027590)	9°34'15.3"N	73°47'38.9"W	Precipitación (d)	----	
Caucasia (26247020)	7°57'43.7"N	75°11'37.3"W	Nivel de agua automatizado (h) y manual (d)	46.12 m.s.n.m.	~371
Gamarra (23217080)	8°17'3.43"N	73°45'12.2"W	Nivel de agua automatizado (h)	N/A	~343
Barrancabermeja (23157030)	7°3'36.7"N	73°52'33.6"W	Nivel de agua automatizado (h) y manual (d)	70.49 m.s.n.m.	~498



5 Diseño del Sistema SCADA

El sistema SCADA se considera como el centro de control del Sistema de control operacional. SCADA representa Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) y es un software que se aplica a un nivel encima del hardware de control. Como tal, el sistema SCADA funciona a manera de supervisión. La preparación del Sistema SCADA para el Canal del Dique se describe en los párrafos 5.1 y 5.2. Se puede encontrar una descripción más detallada de las especificaciones técnicas del sistema SCADA en la Nota Técnica del Diseño Final del sistema SCADA (Consortio Dique, 2016b). Los demás párrafos de este capítulo describen las normas de control operativo que serán programadas en el sistema SCADA para asistir en la operación de las estructuras de control de agua.

5.1 Operación de las estructuras de control de agua

De acuerdo con los Términos de referencia, el Sistema de control necesita ser un sistema automatizado, remoto y sin asistencia. Estas características deben ser bien evaluadas cuando se considere la operación de las estructuras de control de agua. Cada estructura de control de agua se evalúa en términos de robustez, costos y valor agregado si la estructura debe ser operada local o remotamente desde un centro de control. Igualmente, se decide qué estructura será operada (semi-)manualmente (decisión humana en base a la asesoría de SCADA) o automáticamente (SCADA realiza las acciones sin interferencia humana). La operación propuesta de las estructuras de control de agua se muestra en la siguiente Tabla 2 y se explica en adelante.



Tabla 2. Panorama general del tipo de control de agua propuesto para todas las estructuras de control de agua

Tipo control de agua →	Control local		Control remoto	
Toma de decisión →	(Semi-)manual (SCADA recomienda una acción)		(Semi-)manual (SCADA advises an action)	Automatizado (SCADA realiza acciones)
Estructura ↓				
Compuerta Calamar	Opción Back-up		Preferido durante eventos de pulso	Preferido durante flujo base
El Porvenir	Preferido		N/A	N/A
Villa Rosa	Preferido		N/A	N/A
Alcantarillas para flujo de entrada y salida en ciénagas	Preferido		Opcional	N/A
Compuerta Puerto Badel	Preferido		N/A	N/A

Compuertas Calamar

Esta estructura de compuertas es el componente clave del Sistema CDD y maneja la dinámica del mismo. Su operación es vital para salvaguardar la suficiente profundidad de agua para la navegación, minimizar la cantidad de sedimento que ingresa al Sistema CDD y proveer suficiente agua para llenar el reservorio Guájaro y descargar el sistema de ciénagas. Se propone controlar esta estructura de manera remota desde el centro de control que estará ubicado en la compuerta y esclusa de Calamar. Desde este centro de control, la estructura de la compuerta puede ser controlada a través del sistema SCADA. Se propone el control automatizado, según las normas de control operativo programadas en SCADA, para habilitar el control continuo durante las condiciones normales cuando se permite un flujo base en el Sistema CDD. En condiciones especiales cuando el Sistema de soporte de decisiones señale un aviso de apertura de la compuerta de Calamar debido a una ola de inundación próxima, la decisión de iniciar realmente la apertura de la compuerta de Calamar la toma el operador. Por ello, hay un comando (semi-)manual que se necesita para iniciar este régimen de apertura. Los procedimientos de apertura, espera y cierre que siguen serán ejecutados automáticamente. En todos los casos el operador podrá anular las operaciones de control automatizado.



Compuertas El Porvenir y Villa Rosa

Estas estructuras de compuertas son responsables de llenar y vaciar el reservorio Guájaro y están listas para ser construidas. La operación de estas estructuras es realizada por CRA (Corporación Autónoma Regional de Atlántico) que es la organización responsable de estas compuertas. Las compuertas de El Porvenir y Villa Rosa siempre han sido controladas local y manualmente. El control automatizado de estas compuertas requeriría inversiones y mantenimiento y pruebas considerables. Asimismo, se anticipa que los cambios en los niveles de agua del reservorio Guájaro sean lentos, lo cual haría que el control automatizado no fuese esencial. Se propone permanecer controlando las compuertas de El Porvenir y Villa Rosa localmente. Se podrá pronosticar el ajuste de las compuertas de Guájaro por adelantado lo cual permite realizar una planificación de la operación futura. La decisión de abrir la compuerta de El Provenir la toma el operador en el centro de control, el cual es alertado por el Sistema SCADA en caso de que las compuertas de Calamar se puedan abrir adicionalmente para permitir un pulso de inundación en el sistema CDD. Por ello, se brinda un comando (semi-)manual para iniciar la apertura de las compuertas de El Porvenir. El centro de control en Calamar informará al CRA o a la persona responsable de las compuertas de El Porvenir, que las compuertas debe abrir o cerrarse y en qué momento. El contacto estrecho entre la autoridad responsable del control de las compuertas en Calamar y el CRA es esencial.

Alcantarillas para el flujo de entrada y salida de las ciénagas

Se espera que las alcantarillas que están ubicadas en el Sistema CDD para permitir la entrada y salida del flujo de las ciénagas, tengan un número limitado de acciones de control durante el año. Por consiguiente, la decisión de abrir o cerrar estas compuertas es semi-manual, dado que la decisión es tomada por el jefe de control de agua, quien es alertado por el sistema SCADA para abrir o cerrar determinada alcantarilla. La alcantarilla será operada localmente. Si los desarrollos futuros exigen que estas alcantarillas sean operadas remotamente desde el centro de control en Calamar, entonces estas alcantarillas pueden ser ajustadas relativamente fácil. Se brinda mayor información



acerca de esa extensión en la Nota Técnica del Diseño Final del sistema SCADA (Consortio Dique, 2016b)

Puerto Badel

En Puerto Badel no hay compuertas presentes. Cualquier flujo que atraviesa se origina desde las aperturas en la puerta o puertas de la esclusa. El flujo de agua que atraviesa la esclusa se describe en más detalle en el párrafo 5.11. La decisión de abrir o cerrar estas compuertas es manual y lo decide el jefe de control de agua de la esclusa y se basa en mediciones ecológicas. Las puertas de la esclusa serán operadas localmente.

Solo se necesita ajustar las 2 compuertas pequeñas que controlan la entrada hacia los dos canales de riego unas veces al año. Las simulaciones de modelos hidráulicos muestran que el nivel de agua en Puerto Badel es estable alrededor de 1,6 msnm durante las condiciones de flujo base y alrededor de 2,3-2,6 msnm durante los pulsos. Para poder mantener un flujo continuo, se deben ajustar las configuraciones de la compuerta al principio y al final de los pulsos. Esto lo puede desempeñar el equipo presente en Puerto Badel.

5.2 Preparación SCADA

El sistema SCADA se centra en la adquisición de datos y en la presentación de una Interfaz Humano-Máquina centralizada, aunque también permite enviar comandos de alto nivel a través del hardware de control para proveer control del equipo remoto, tal como la instrucción de iniciar un motor o cambiar un punto fijo. Además, es un sistema de control automatizado que recolecta datos clave y parámetros de calidad en línea de las compuertas y los metros del nivel de agua. Toda la operación de las esclusas y las estructuras de control de agua será controlada desde el Sistema SCADA ubicado en la Sala de Control Principal del Canal del Dique (ver Figura 13).

Configuración de los PLC

El sistema SCADA consiste en unidades del Controlador Lógico Programable (PLC) en diferentes ubicaciones;



- Oficina Principal del Operador del sistema.
- Salas de control principal en Calamar y Puerto Badel (2x)
- Estructuras de entrada y salida de flujo (6x)
- Salas para el centro de control a motor (MCC);
- Generadores.

Cada PLC está conectado a SCADA por cable de fibra óptica. Los sistemas SCADA de Calamar y Puerto Badel están conectados por GPRS o ADSL a la Sede. Para el futuro también se prepararán para la comunicación de fibra de vidrio. El equipo de campo (medidores de nivel) está conectado por radio o GPRS al sistema SCADA. Todos los PLC tanto en Calamar como Puerto Badel dentro y alrededor del complejo deben estar conectados con cable óptico de fibra. Todos los PLC en estas ubicaciones, incluido el servidor SCADA, se conectarán en una red en anillo para garantizar que, en caso de que se rompa un cable, la red siga funcionando. Las principales partes del SCADA (sin el equipo de campo de fibra de vidrio) se presentan en el diagrama del sistema que aparece en la Figura 13. Los PLC en las estructuras de entrada y salida son PLC únicos que se comunican con Calamar y Puerto Badel por GPRS o Radio.

SCADA y DSS

El sistema SCADA se conecta con el Sistema DSS en Calamar. Hay un intercambio de información de dos vías entre los sistemas. El sistema SCADA provee mediciones de telemetría al Sistema DSS. A su vez, el Sistema DSS provee información de predicción al Sistema SCADA después de lo cual el Sistema SCADA decide automáticamente las acciones que se requiere y necesita asignar para la operación de las estructuras de control de agua. El sistema SCADA usa juegos de normas de control operativo para cada estructura de control de agua. Estas normas de control se explican en más detalle en los párrafos 5.4 a 5.11.

Las tres compuertas de Calamar pueden ser operadas automática y remotamente por SCADA. La mayoría de estructuras de control de agua en el sistema CDD se operan manualmente. El sistema SCADA alertará al jefe de control de agua acerca de las acciones necesarias a tiempo.

Hay precauciones de seguridad que se deben tomar en cuenta en una determinada situación y esta se encuentra en el manual del control de agua. Los sistemas SCADA y PLC deben ser protegidos mediante una contraseña, estar conectados a través de una red VPN segura y ser operados solo manualmente cuando haya una situación segura (por ejemplo, flujos bajos o diferencias pequeñas de fuente (*head*)).

Se puede encontrar una descripción más detallada del sistema SCADA en el informe CD.ID.33H.ELE.INF.00.001 (Informe de Diseño Eléctrico y SCADA Detallado de la Estructura para Control Activo de Caudales y de las Esclusas de Calamar y Puerto Badel).

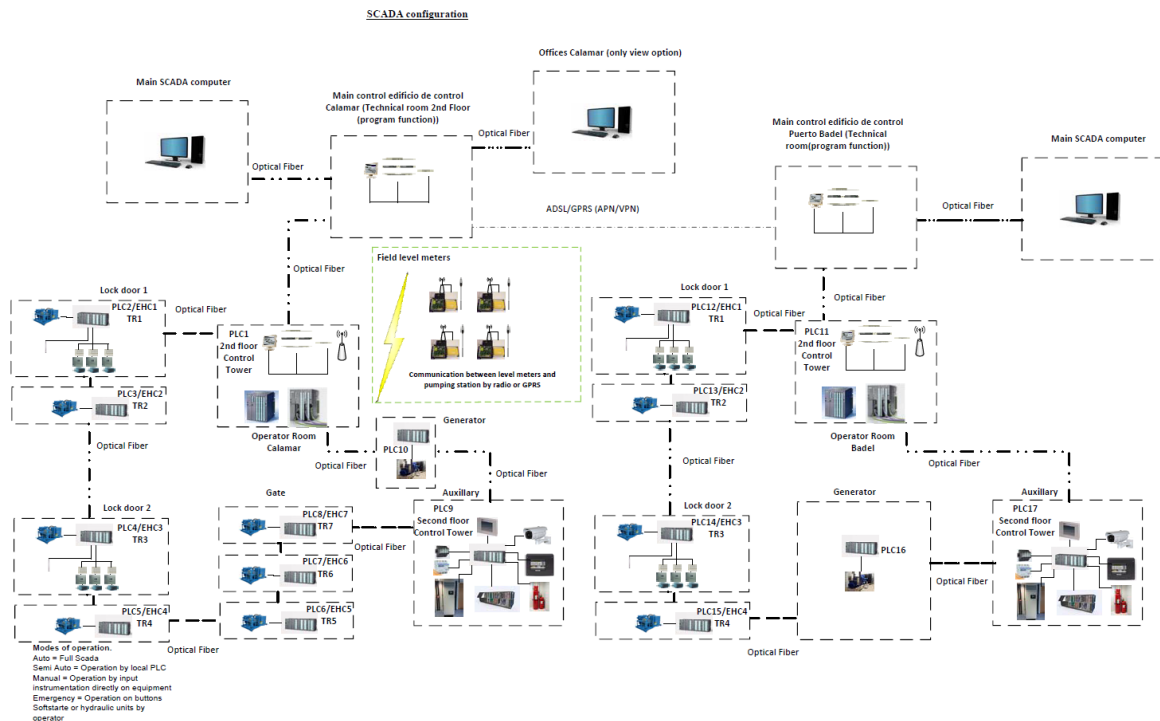


Figura 13. Panorama de los PLC en la configuración SCADA del sistema operacional del Canal del Dique (ver también anexo 1)

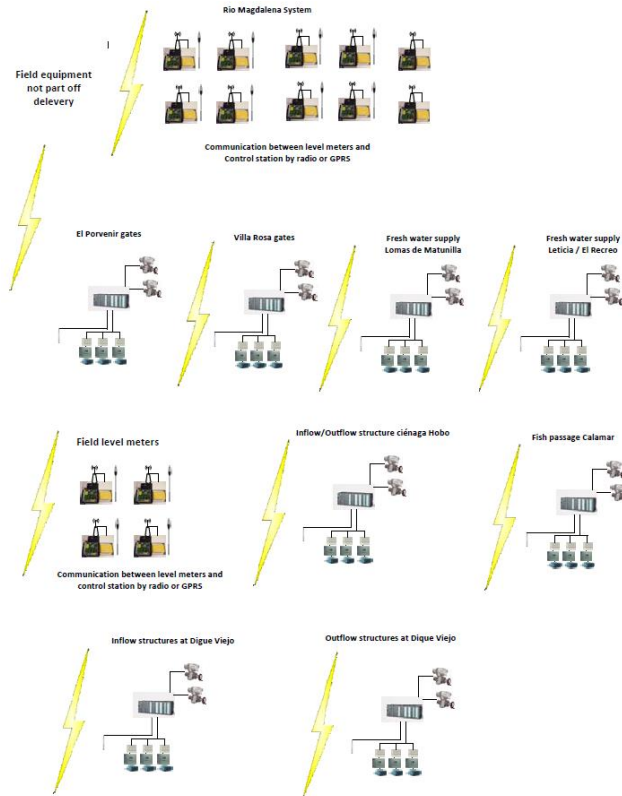


Figura 14. Estaciones de mediciones en la cuenca del Río Magdalena y el sistema Canal del Dique y las compuertas (menoras) de control en todo el sistema

5.3 Río Magdalena

5.3.1 Régimen de flujo

El comportamiento del flujo del Río Magdalena es un punto de inicio para definir las normas apropiadas de control de agua que facilitan los intereses del sistema CDD. Para este propósito, los niveles de agua en Calamar desde 1985 a 2014 han sido analizados para obtener conocimientos del comportamiento promedio del régimen de nivel de agua. La Figura 15 Muestra un diagrama de caja de las estadísticas mensuales calculadas en 30 años incluyendo la media, percentil 25 y 75

y los valores atípicos. La Tabla 3 muestra el nivel de agua promedio mensual en 30 años en Calamar para el período de 1985 a 2014.

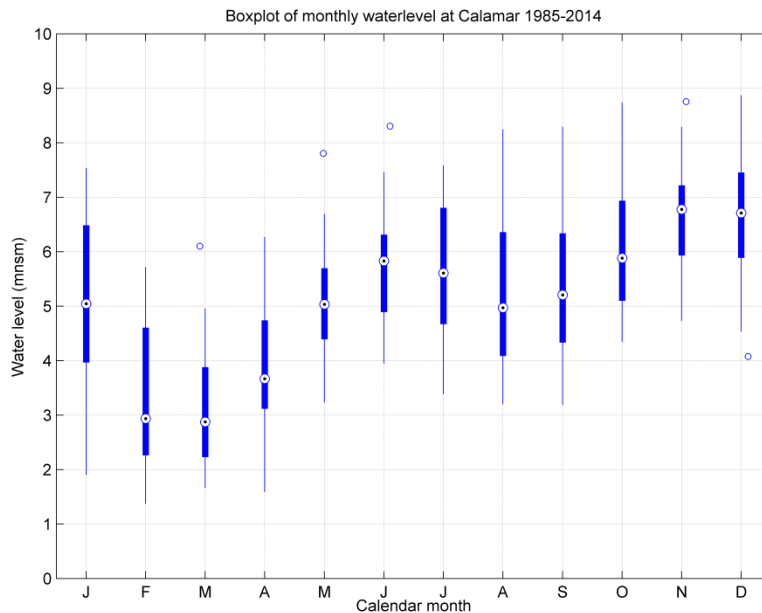


Figura 15. Diagrama de caja de las estadísticas mensuales de los niveles de agua en Calamar para el período 1985 a 2014

La figura y la tabla muestran que, en general, hay dos olas de inundación cada año; alrededor de junio y julio, así como alrededor de noviembre y diciembre. El nivel mínimo y máximo registrado en el período observado fue, respectivamente, 1.20 msnm y 9.14 msnm. Los meses de febrero a abril tienen, en general, niveles bajos de agua.



Tabla 3. Nivel de agua promedio mensual en 30 años en Calamar

Month	Mean water level at Calamar (msnm)
January	5.02
February	3.33
March	3.15
April	3.87
May	5.13
June	5.81
July	5.61
August	5.27
September	5.44
Oktober	6.01
November	6.71
December	6.71

La compuerta en Calamar es la estructura más importante que rige el manejo de agua en el Sistema CDD. La afluencia controlada en el Canal Del Dique se define por los niveles de agua en Calamar. El patrón de la afluencia controlada se define por tres regímenes típicos del flujo:

- Flujo base (2,20 msnm aguas abajo de las compuertas): Se mantendrá un nivel de agua controlada en el Canal, correspondiente al nivel de agua que se supera el 95% de las veces en la situación actual (2,05 msnm aguas abajo de las compuertas) que incluye una incertidumbre debido al control. Se necesita una descarga de unos 70 m³/s para alcanzar este nivel de agua. La descarga real a través de la compuerta en Calamar que se requiere para mantener la profundidad suficiente para la navegación variará dependiendo de la evaporación real, el uso del agua para el riego y el suministro de agua potable, el intercambio con ciénagas y el exceso de agua del caño Dique Viejo. Esta descarga también es suficiente para otras funciones como el suministro de agua potable y la supresión de la intrusión de sal en



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



el área del delta. La mayor parte del año se puede lograr este flujo base. Estos niveles de agua no se pueden alcanzar en períodos en que el Río Magdalena tiene niveles de agua extremadamente bajos (5% de las veces). En la situación actual esto también llevaría a problemas en el Canal.

- Primera ola de inundación (el nivel variable de agua depende del nivel objetivo y el medido en Guájaro y en la disponibilidad de agua en el Río Magdalena): En los meses de mayo/junio/julio, el reservorio Guájaro necesita ser parcialmente llenado para cumplir con los objetivos de consumo de agua, calidad de agua y ecología. Un esquema operacional del reservorio desarrollado por CRA (Universidad del Magdalena & CRA, 2012) define los niveles objetivos mínimos y máximos para el flujo de entrada y de salida, respectivamente (ver Figura 16). Durante todo el año, los niveles objetivos (máximo/mínimo) en el reservorio Guájaro dependen en parte del año climatológico El Niño / Normal / La Niña (ya sea que se pronostique mucha lluvia o escasez). En mayo y junio, cuando ocurre la primera ola de inundación (ver Figura 15), los niveles de agua en el Río Magdalena a menudo son lo suficientemente altos para levantar la compuerta en Calamar, permitiendo que la primera ola de inundación entre al sistema y produzca niveles altos al frente de las compuertas de El Porvenir. La disponibilidad natural de los niveles altos de agua en el Río Magdalena desempeña un papel decisivo. Si la primera ola de inundación tiene la altura suficiente, es posible que las ciénagas ya estén descargadas en este momento del año (posible durante los años húmedos). La oportunidad de que las ciénagas se descarguen dos veces al año es casi el 25%. Esta oportunidad se deriva al observar el período 1985 – 2014.
- Segunda ola de inundación (nivel de agua variable dependiendo del nivel objetivo y el medido en Guájaro y disponibilidad de agua en el Río Magdalena): En noviembre, a menudo ocurre una segunda ola de inundación en el Río Magdalena. Cuando los niveles de agua en el Río Magdalena son bastante altos, ya sea para llenar el reservorio Guájaro (si aún no se ha obtenido el nivel objetivo) o para descargar las ciénagas, se permitirá que una

descarga de pico alto ingrese al Canal Del Dique. Si se ejecuta una apertura de Calamar debido a suficiente altura de agua para lavar las ciénagas, cabe asegurar que el evento previo de lavado de las ciénagas sea de más de 3 meses. También, el lavado de las ciénagas ocurre únicamente por una duración máxima de 50 días debido a restricciones ecológicas. Lavados más prolongados ocasionarán más impacto en el Delta (especialmente en el área costera) debido a la descarga alta de sedimentos y agua dulce durante los pulsos. Hay un 60% de chance de que los niveles de agua en el Canal subirán bastante para permitir que el agua fluya en las ciénagas y llenar por completo el reservorio Guájaro. Para obtener estos niveles altos de agua en el Canal se necesita una descarga de más de 800 m³/s, lo que resulta en niveles de agua de más de 6,50 msnm aguas abajo de la compuerta de Calamar.

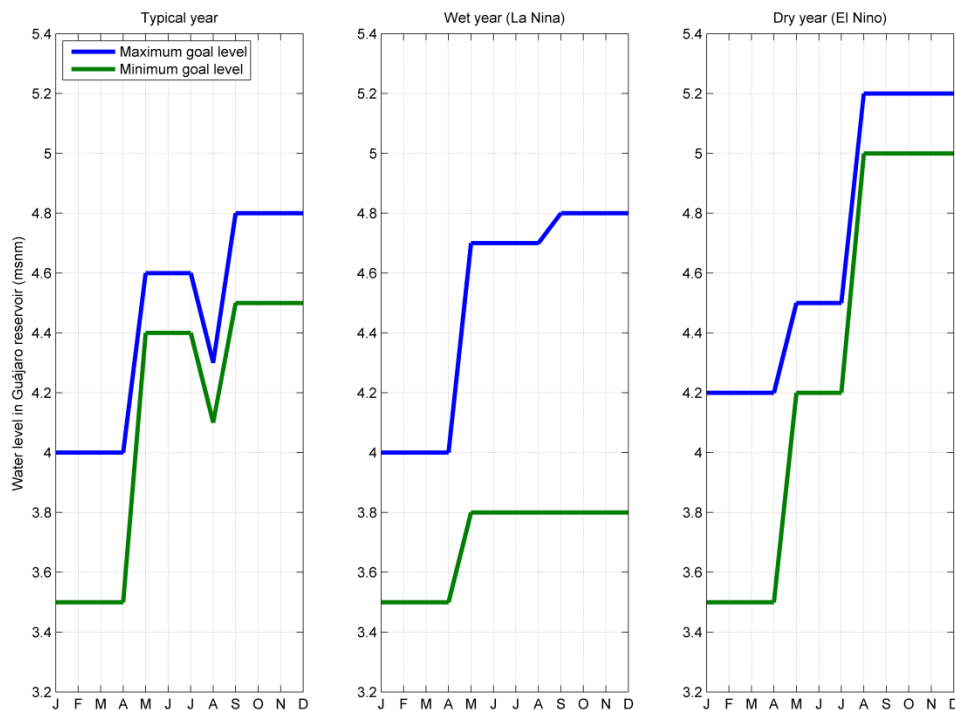


Figura 16. Niveles objetivos mínimos (verde) y máximos (azul) para el reservorio Guájaro conforme al régimen de control CRA



Cabe observar que estos regímenes se pueden anticipar para un año normal (ver Figura 15). En realidad, también podría ser el caso de que en un año en particular ocurra una o incluso ninguna ola alta de inundación en el Río Magdalena. La compuerta en Calamar debe ser operada conforme a determinado esquema que facilite los posibles regímenes de flujo. El llenado de Guájaro es un aspecto importante en el Sistema de control de agua. Hay mucha variabilidad en los niveles objetivos que dependen del mes y del tipo de clima (neutral, El Niño o La Niña). Dado que el tipo de clima puede cambiar durante un año, no se sabe en el momento de una ola de inundación (que ingresa al CDD) si otra ola de inundación será tan alta como para lavar las ciénagas y llenar Guájaro. **Por lo tanto, el objetivo de la operación de las compuertas de Calamar es usar toda posibilidad para hacerlo.**

Se brinda un pronóstico ENSO de 9 meses del tipo de clima, incluyendo probabilidades, en el sitio web: <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/>. Esta fuente (ver por ejemplo) también ofrece el tipo de clima del mes actual. Aquí se puede encontrar información histórica de los tipos de clima: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml. Esto tiene un valor limitado para el Sistema operacional, dado que la declaración del tipo de clima se brinda después de pasar el mes en curso.

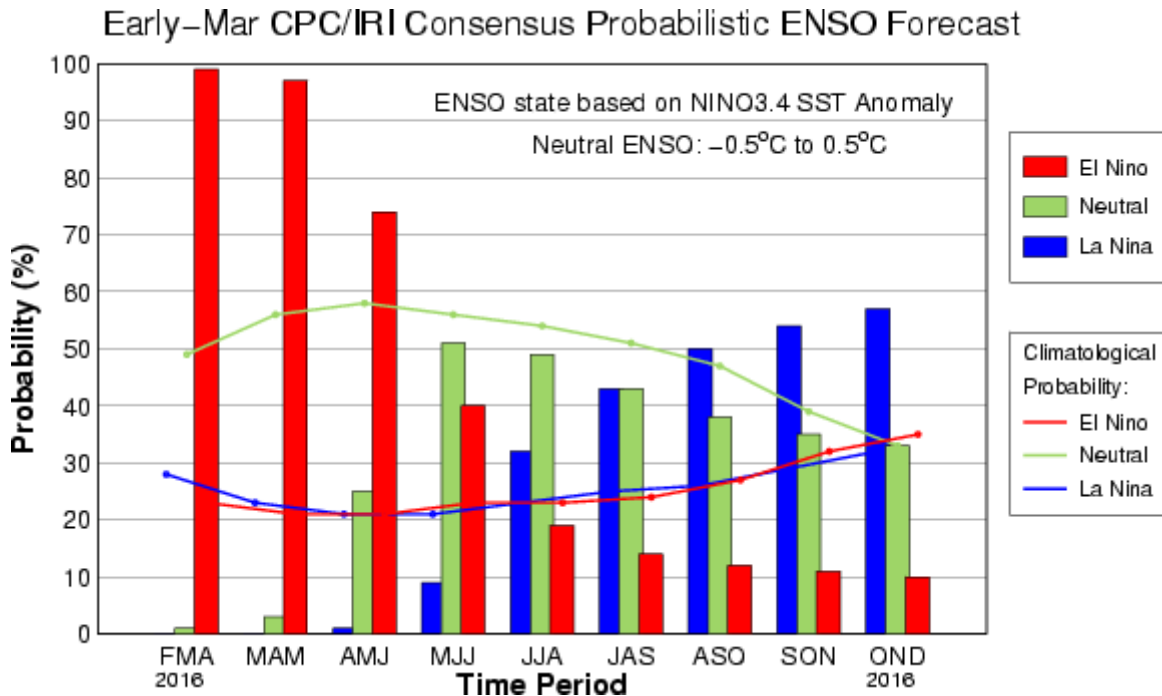


Figura 17. Ejemplo de Pronóstico de Consenso Probabilístico ENSO (Consensus Probabilistic ENSO Forecast) para marzo 2016 (Fuente: Columbia University)

5.3.2 Nivel del umbral en Calamar

La apertura adicional de las compuertas de Calamar se exige por tres razones: para llenar el reservorio Guájaro, para descargar las ciénagas o como emergencia para aliviar los niveles de inundación en el Río Magdalena. Las dos primeras razones solo se pueden ejecutar si el nivel de agua en el Río Magdalena supera un nivel determinado que permita una gradiente suficiente del nivel de agua para que ingrese flujo en las compuertas de El Porvenir o en las ciénagas. El nivel requerido de agua en el Río Magdalena (RM) en el kilómetro 93 (K93) es referido como el nivel de umbral ($H_{RM\ K93,threshold}$).

Cuando se exija la operación de las compuertas de Calamar durante un evento de lavado, porque el reservorio Guájaro puede ser potencialmente llenado, se puede usar una relación entre el nivel



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



observado de agua en Guájaro, el nivel requerido en el lado CDD de El Porvenir para posibilitar la afluencia en Guájaro y el nivel requerido en el Río Magdalena (K93) que debe estar presente con el fin de tener una gradiente de nivel de agua en el sistema CDD que asegure que el nivel requerido en El Porvenir sea alcanzado. El nivel de umbral varía con los niveles variables de agua en Guájaro. El nivel observado en Guájaro más 10 cm es el nivel requerido de agua en la entrada de El Porvenir en el lado CDD. Se asume una fuente de 10 cm, de modo que ocurrirá una diferencia suficiente de Fuente en El Porvenir. También evita que se abran las compuertas de Calamar cuando solo hay unos centímetros de diferencia. Esto podría crear eventos de apertura en los que el reservorio Guájaro apenas se podría llenar. El nivel de agua en el El Porvenir se puede convertir a un nivel requerido de agua en el Río Magdalena usando la relación (ver Figura 18):

$$H_{RM\ K93,threshold} = 0.017374H_{El\ Porvenir,required}^2 + 1.210289H_{El\ Porvenir,required} - 0.251373 ,$$

Que también se puede expresar en términos de nivel de agua observado en Guájaro:

$$H_{RM\ K93,threshold} = 0.017374(H_{Guajaro,observed} + 0.1)^2 + 1.210289(H_{Guajaro,observed} + 0.1) - 0.251373 .$$

El nivel del umbral puede estar relacionado con la ubicación del indicador de nivel de agua en el Río Magdalena y asume que las compuertas están (suficientemente) abiertas e incluye algún efecto de remanso debido a las compuertas de Calamar. En el caso de que se inicie un evento de lavado, las compuertas generalmente se abrirán completamente. El efecto de remanso puede ser del orden de 2 a 5 cm dependiendo del nivel de agua en el Río Magdalena (véase Figura 41). El nivel de umbral se puede comparar con un nivel de agua pronosticado en esta ubicación para establecer si se debe iniciar un procedimiento de lavado. Dado que el nivel de agua pronosticado $H_{RM\ K93,pronosticado}$, que es el salida de un modelo de regresión (véase numeral 6.2.2), no incluye el efecto de remanso de la compuerta en Calamar, es necesario corregir el nivel de agua previsto antes de que se comparen estos niveles de agua como parte de la evaluación de criterios necesaria antes de realizar un

procedimiento de lavado para llenar Guájaro (véase numeral 5.4.2). Esta corrección se explica con más detalle en el numeral 6.2.3.

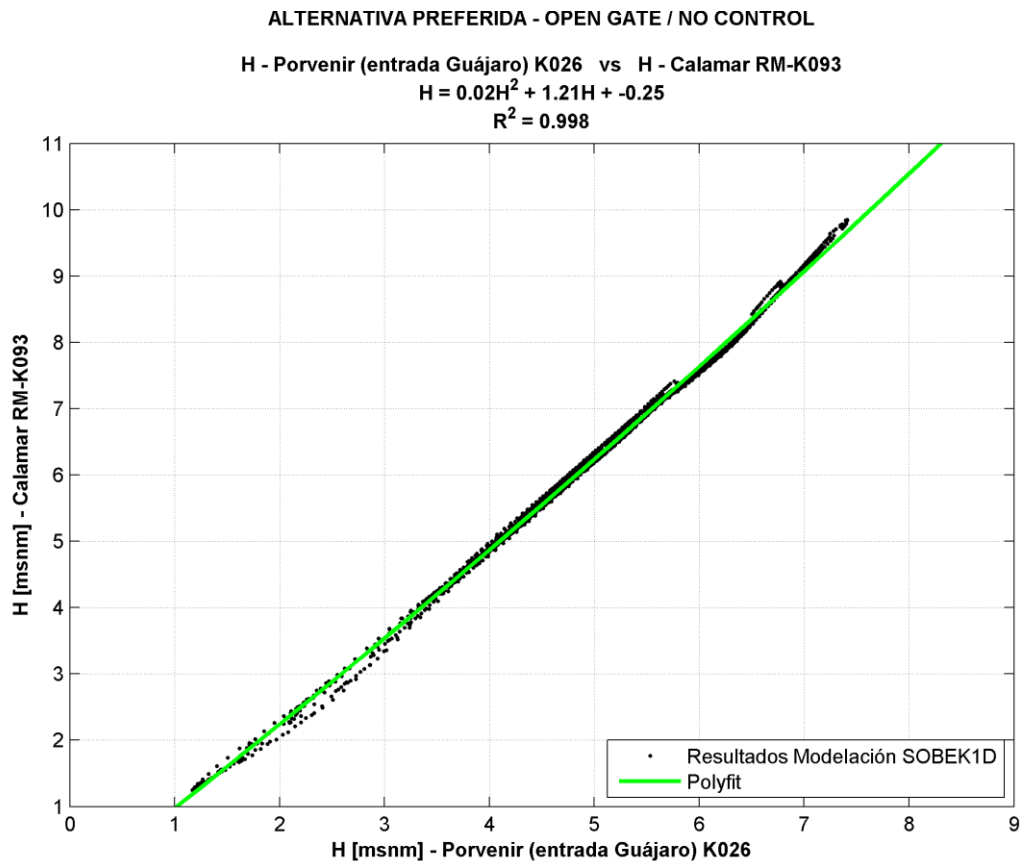


Figura 18. Relación del nivel de agua entre El Porvenir y Calamar

Si el nivel de agua en Guájaro excede el objetivo mínimo de Guájaro, no se necesita llenar el reservorio Guájaro. En ese caso, el nivel del umbral en Calamar es el nivel mínimo de agua necesario en Calamar para empezar la descarga de las ciénagas, que es 6.86 msnm. Este umbral es fijo y simplifica la verificación con el nivel de agua pronosticado. Nuevamente, el último nivel de agua necesita una corrección por el



efecto de remanso en una configuración de compuertas (parcial o totalmente) abiertas.

5.3.3 Pronóstico

Usar un pronóstico proveerá información que ayuda a la toma de decisiones para abrir las compuertas de Calamar antes de que el nivel del umbral sea alcanzado en el Río Magdalena. Sin un pronóstico el Sistema solo puede ser controlado usando mediciones en tiempo real, lo que significa que la compuerta de Calamar se abre una vez que se alcanza el valor del umbral. La desventaja de este planteamiento sería que el primer par de días de la ola de inundación no se pueden usar para descargar las ciénagas y/o llenar Guájaro, dado que la apertura total de la compuerta de Calamar puede tomar hasta 5 días. Al usar un pronóstico se maximizaría el uso de la ola de inundación que está en línea con el objetivo de usar cada posibilidad de abrir la compuerta de Calamar para llenar Guájaro y/o descargar las ciénagas.

5.3.4 Concentración de sedimentos suspendidos de la ola de inundación

La concentración de sedimentos suspendidos durante la primera parte de la ola de inundación (curva ascendente del hidrograma) en el Río Magdalena es superior al promedio (ver Figura 19). En promedio, la concentración pico suspendida alcanza el pico en marzo y abril, que es casi la mitad de la curva ascendente del hidrograma de descarga. Al permitir que la primera parte de la ola llene el Sistema CDD, pueden entrar al canal concentraciones de sedimentos relativamente altas. Esto podría tener un impacto negativo en el ecosistema y costos de mantenimiento. Sin embargo, evitar que esta primera parte de la ola de inundación ingrese al sistema CCD significa que se perdería una posibilidad de llenar Guájaro y/o descargar las ciénagas. La alternativa preferida que se ha elegido reduce la entrada de sedimentos en suspensión en Calamar que ingresan al sistema CDD desde el Río Magdalena de 8 Mton/año a 3.8 Mton/año (Consortio Dique (2015b)). Una reducción más extensa del input de sedimentos mediante un control inteligente o tiempo para cerrar/abrir la compuerta de Calamar



Further reduction of the sediment input by smart control o Time to close/open Calamar gate

El cambio de nivel de agua que ocurre debido a la operación de la compuerta de Calamar es un parámetro de importancia cuando se define un esquema apropiado de operación. Mientras más lenta la velocidad de operación más difícil se vuelve anticipar un evento próximo de apertura de la compuerta de Calamar. Por otro lado, la velocidad por la cual se opera la estructura, y por ende la manera en que cambia el nivel de agua, debe estar de acuerdo con los límites ecológicos, estructurales y de seguridad. Desde un punto de vista hidráulico, el cambio máximo de nivel de agua por día que ocurrió en Calamar entre 1985 y 2012 fue de 38 cm. La estructura de la compuerta en Calamar es estructuralmente capaz de manejar los cambios de nivel de agua hasta 100 cm al día durante la apertura y casi 50 cm al día mientras cierra. Este índice de cambio tampoco afecta negativamente la ecología del Sistema del canal en sí. Estas dimensiones de cambios en el nivel y velocidad de agua en el canal pueden ser manejadas fácilmente por los peces y demás especies acuáticas presentes. Cuando el nivel de agua en el Canal alcanza el umbral en donde el agua empieza a fluir en/sobre las estructuras de entrada de las ciénagas, puede ser necesario bajar la velocidad de apertura y cierre por los animales terrestres, peces y macrofauna que pueden estar atrapados de alguna otra manera (ver casillero de texto más abajo). Por razones de seguridad, es importante tener líneas de comunicación claras para los ciudadanos y agricultores que viven o trabajan en el Sistema del CDD. Ellos deben estar apropiadamente informados de que el nivel de agua en el CDD está por cambiar de una manera no natural (los cambios del nivel debido a las lluvias también ocurren). La compuerta de Calamar sería un valor agregado, pero esto no siempre es posible. Tal como se ha descrito anteriormente, el objetivo de la operación de la compuerta de Calamar es usar toda posibilidad para llenar Guájaro y/o lavar las ciénagas, porque no es seguro cuánto durará una ola de inundación en particular. En la fase de diseño detallado, las normas operativas de control, que se describen más abajo, serán optimizadas más extensamente y se explorarán las posibilidades para posponer la apertura de la compuerta de Calamar. Esto sería beneficioso desde un punto de vista de input de sedimentos en suspensión y también reduciría el tiempo de espera

requerido para el pronóstico. Se pueden usar los resultados del monitoreo de la carga de sedimentos en suspensión relacionados con la ola de inundación en el Río Magdalena, los efectos negativos de los sedimentos (por ejemplo, impactos en la calidad de agua, sedimentación, costos de dragado) y el efecto de períodos de sequía más prolongados en la ecología de las ciénagas como información para la optimización futura del sistema de control operacional una vez que el proyecto haya sido realizado.

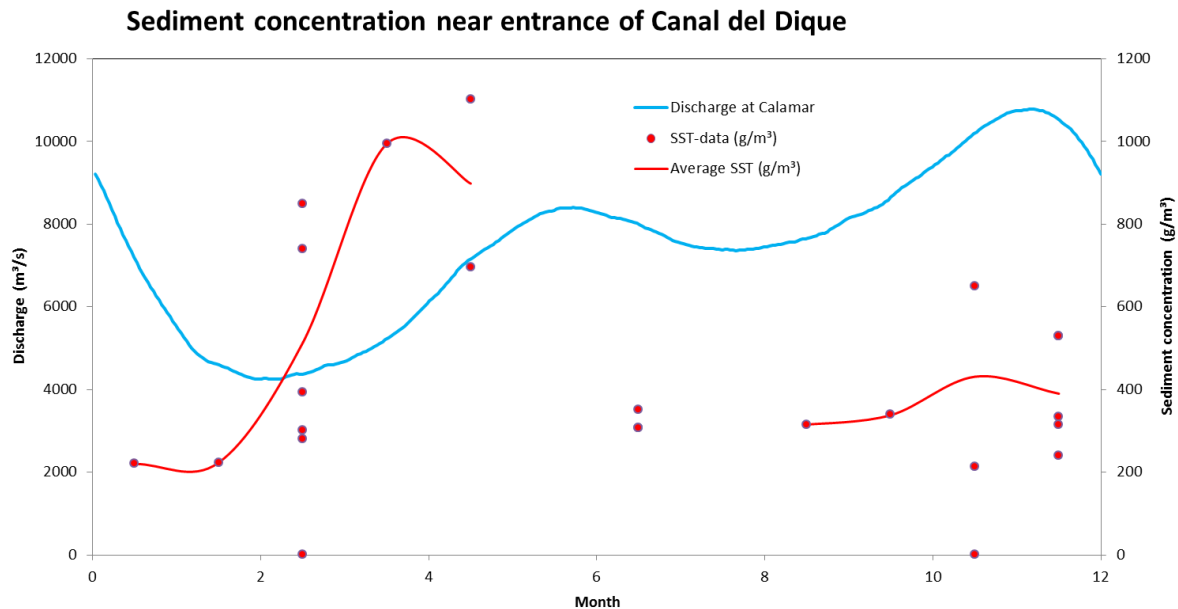


Figura 19. Variación estacional de descarga y concentración de sedimentos en Calamar. Todos los datos disponibles fueron promediados para establecer los valores promedio mensuales. Se observa que los valores para mayo y julio están ausentes, debido a que no hay dato alguno disponible para estos meses (Consortio Dique, 2015a).

5.3.5 Velocidad operativa de las compuertas de Calamar

El cambio de nivel de agua que se produce debido al funcionamiento de la compuerta de Calamar es un parámetro que es importante cuando se



define un esquema de operación apropiado. Cuanto más lenta sea la velocidad de operación, más difícil será prever un próximo evento de apertura de la compuerta de Calamar. Por otro lado, la velocidad con la que se opera la estructura y, por tanto, la forma en que se cambia el nivel del agua, debe ajustarse a las limitaciones ecológicas, de seguridad y geotécnicas/estructurales.

Desde el punto de vista hidráulico se encontró que el cambio máximo nivel de agua por día que se produjo en Calamar entre 1985 y 2012 fue de 38 cm. Para el control se definen una velocidad máxima de aumento y disminución de los niveles de agua. Desde un punto de vista geotécnico y estructural se permite un aumento máximo de 100 cm por día, pero la disminución de los niveles de agua no debe ser más rápida de 30 cm/día ya que las fuerzas sobre las estructuras podrían llegar a ser demasiado altas después de varios días con niveles de agua descendentes.

Calculaciones geotécnicas conservativas para los nuevos taludes y nuevas orrillas cerca complejo Calamar (ver informe CD.ID.330.CIV.INF.02-003 y CD.ID.330.CIV.INF.02-004 de la presa y la esclusa del complejo Calamar) muestran que la disminución de los niveles de agua puede ser 30cm/día por un periodo de por lo menos 10 días. Más aguas arriba la disminución del nivel de agua reducirá.

Otros aspectos importantes para la estabilidad de los diques son:

- El nivel máximo del agua en el Canal del Dique que será 7.0msnm aguas abajo del complejo Calamar, que es más bajo que en la situación actual.
- Orrillas críticas y importantes serán protegidas, especialmente donde hay pueblos y en las curvas en el Canal.
- Aunque las calculaciones muestran no problemas significantes con la disminución del nivel de agua, es recomendada que durante los primeros pulsos se monitorean extensivos los diques y orrillas.

Estas dimensiones de cambios en el nivel y velocidad de agua en el canal en sí pueden ser manejadas fácilmente por los peces y demás especies acuáticas presentes. Por razones de seguridad y sociales, es



importante tener líneas de comunicación claras para los ciudadanos y agricultores que viven y trabajan en el Sistema del CDD. Ellos deben estar apropiadamente informados de que el nivel de agua en el CDD está por cambiar de una manera no natural (los cambios del nivel debido a las lluvias también ocurren).

Consideración ecológica en la apertura de la compuerta de Calamar

El cambio del nivel de agua en las ciénagas será menor que en Calamar debido a la gradiente del nivel de agua y restricción por las estructuras de entrada. La inundación o drenaje de las ciénagas podría afectar las orillas poco profundas, porque un cambio rápido del nivel de agua podría dejar animales atrapados. Durante la inundación, una subida lenta del nivel de agua permite que los animales terrestres abandonen las costas, mientras que una disminución lenta del nivel de agua permite que los peces y macrofauna se retiren con el agua. Adicionalmente, el agua en retirada es un estímulo para que las especies de peces migratorios abandonen las ciénagas y naden aguas arriba hacia el Río Magdalena. Una disminución lenta del nivel de agua les da tiempo para hacerlo.

Para el funcionamiento, se asume un cambio de nivel de agua de 96 cm por día aguas abajo de la compuerta de Calamar en el Canal del Dique durante el procedimiento de apertura. Este aumento del nivel de agua es igual a 4 cm por hora aguas abajo de las compuertas. Suponiendo un nivel de agua de 2,20 msnm (condiciones de flujo base), el evento de apertura de las compuertas de Calamar dura de 2 a 5 días dependiendo del nivel de agua en el Río Magdalena y el embalse de Guájaro (véase Figura 20).

Durante el procedimiento de cierre, se supone un cambio de nivel de agua aguas abajo de las compuertas en Calamar de 30 cm por día. Esta disminución de nivel de agua es igual a 1,3 cm por hora y hace que el evento de apertura o cierre de la compuerta de Calamar dure aproximadamente de 4 a 11 días, suponiendo que el nivel de agua retroceda al nivel de flujo base de 2,20 msnm. La tasa de cambio de

nivel de agua durante el cierre de la compuerta de Calamar se reduce con respecto a la apertura y está más en línea con la variabilidad natural del Río Magdalena para evitar cualquier problema que pudiera surgir debido a las diferencias de presión en las aguas subterráneas a ambos lados de la estructura de la compuerta de Calamar. Cabe señalar que este cambio de nivel de agua solo está presente justo aguas abajo de la compuerta de Calamar. El cambio del nivel del agua disminuye en sentido descendente, por ejemplo 20 cm/día en embalse Guájaro, 15 cm/día en Mahates y 5 cm/día en Puerto Badel.

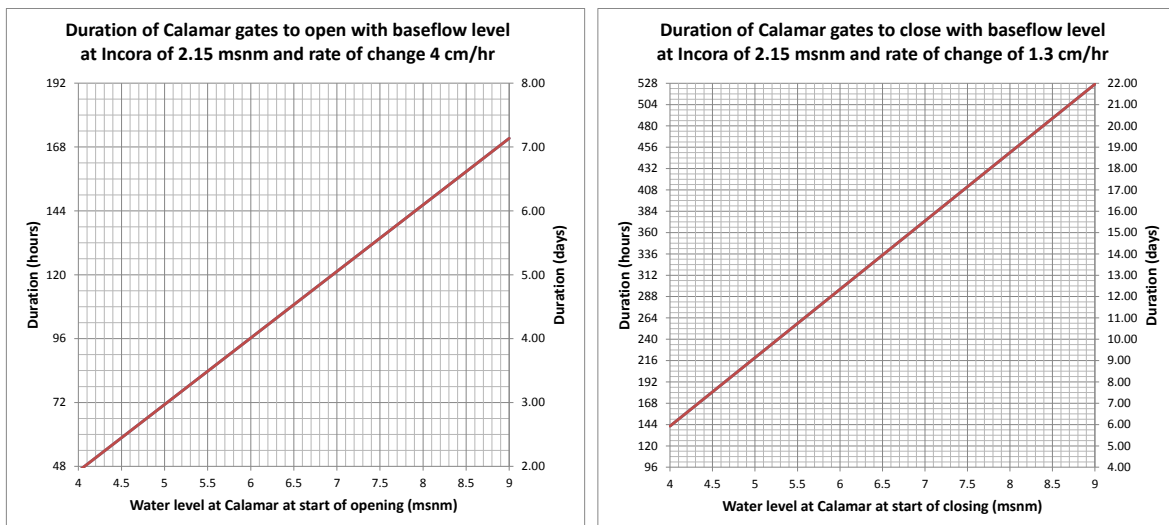


Figura 20 Relación entre el nivel de agua en Calamar y la duración para que la compuerta se abra (curva izquierda) o cierre (curva derecha) en días y horas

Impacto en la comunidad por la apertura de las compuertas de Calamar

Especialmente, la tasa de cambio definida del nivel de agua de 4 cm/hora para la apertura adicional de las compuertas de Calamar durante un evento de lavado es (algo) más grande que en la situación natural. Esta tasa puede no solo impactar la ecología, sino también la respuesta de las comunidades locales que viven a lo largo del Canal del Dique. Cuando se inicia un evento de lavado, el nivel de agua subirá más rápidamente de lo que estas comunidades están acostumbradas. Se



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



recomienda usar una tasa de cambio de nivel de agua menor aguas debajo de las compuertas Calamar durante el primer par de eventos de lavado que están permitidos en el sistema CDD. En este período de prueba, los jefes del control de agua y las comunidades locales pueden familiarizarse con las nuevas obras del Sistema y podrán adaptar el control de agua si fuese necesario. De esta manera, las fallas o accidentes debido a la subida relativamente rápida del nivel de agua se pueden evitar mientras que las comunidades locales sean más conscientes y puedan anticiparse mejor a la nueva tasa de subida del nivel de agua. Se recomienda establecer los puntos locales de contacto para cada comunidad que sea afectada por un evento de lavado, de manera que el jefe del control de agua de las compuertas de Calamar pueda informar a estos contactos de manera oportuna acerca de una (posible) apertura futura. Entonces, los contactos pueden informar a las comunidades locales (es decir, agricultores y pescadores) que se avecina un evento de lavado para que se tomen las medidas apropiadas de antemano.

5.4 Control operativo de las compuertas de Calamar

Tal como se ha discutido en los párrafos anteriores, las compuertas de Calamar son las estructuras principales de control de agua que regulan el sistema CDD. Su control de agua es la más compleja de todas las estructuras de control de agua y depende de muchos parámetros diferentes. Básicamente, hay dos regímenes principales de control: el flujo base y el régimen de lavado. El régimen de lavado se divide en procedimientos de control para la apertura, período provisional y el cierre. La Figura 21 muestra una visión esquemática del control de agua para las compuertas de Calamar. En los siguientes párrafos se explica el control de agua en detalle.

DIAGRAMA DE FLUJO PARA LAS COMPUERTAS DE CALAMAR

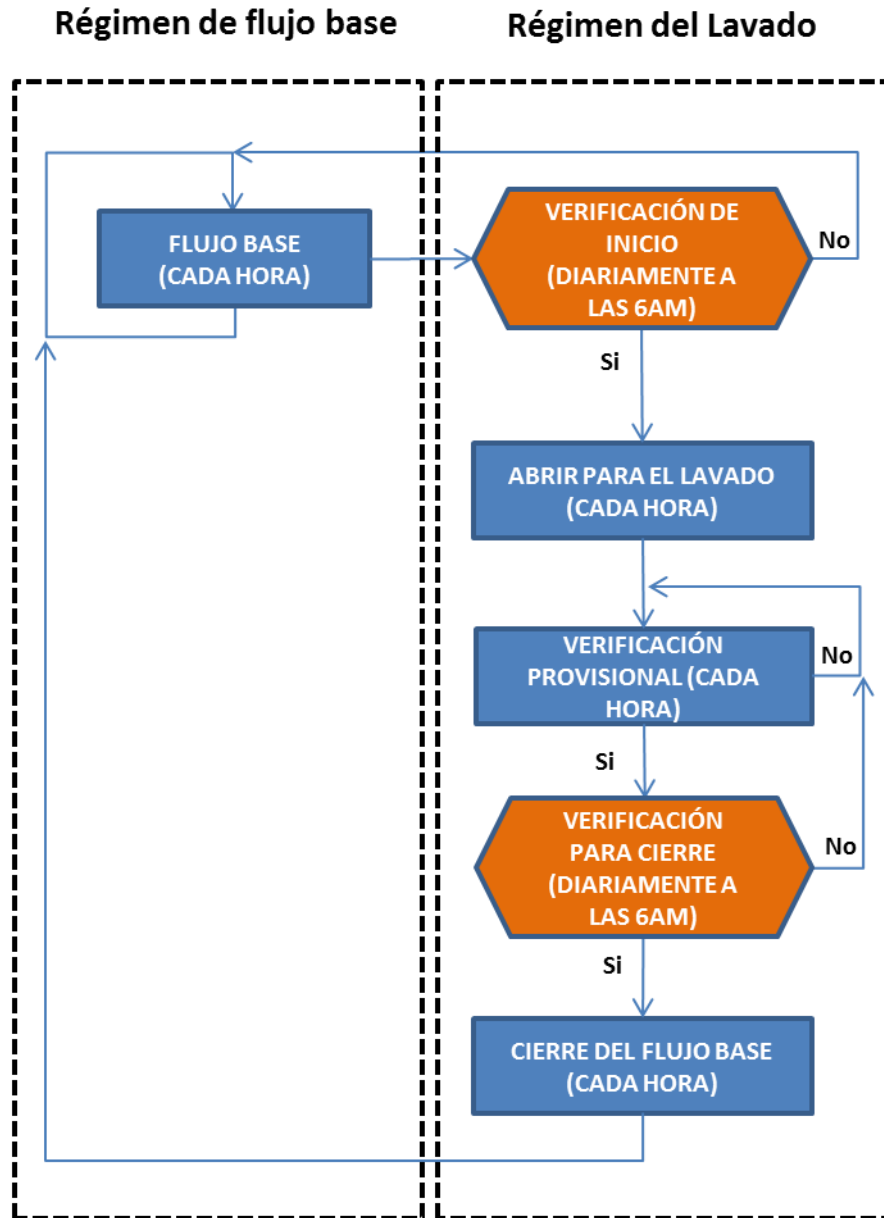


Figura 21 Visión esquemática del control de agua de las compuertas de Calamar



5.4.1 Ajuste de compuerta

Las compuertas de Calamar son operadas de forma remota y automática por parte del sistema SCADA. Los párrafos siguientes describen cuándo se operan estas compuertas en condiciones de flujo base o de lavado. Este párrafo describe el esquema general que debe seguirse para cualquier ajuste de compuerta.

Cada ajuste de compuerta comienza con niveles conocidos de agua observada aguas arriba y abajo de la compuerta. El nivel de agua aguas abajo de la compuerta puede traducirse a una descarga basada en la relación encontrada entre el nivel de agua y la descarga. Esta relación se ha basado en los cálculos del modelo, pero posteriormente se pueden recalibrar en función de las mediciones de descarga en diferentes campañas. Además, se conocen los ajustes reales de la compuerta.

En cada procedimiento se define un nivel de agua objetivo. En el procedimiento "Flujo Base" y "Verificación Provisional", estos niveles de agua objetivo se fijan respectivamente en 2,20 y 7,10 msnm aguas abajo de las compuertas de Calamar. En los procedimientos 'Abrir para el Lavado' y 'Cerrar a Flujo Base', este objetivo se define en cada nuevo paso en el tiempo.

Solo se ajustarán las compuertas cuando el nivel de agua medido aguas abajo de la compuerta se desvíe demasiado del nivel de agua objetivo (> 5 cm).

El sistema SCADA calculará un nuevo área total de las aberturas de la compuerta para el nuevo paso de tiempo en el cual será válido un (nuevo) nivel de agua objetivo.

Se ha utilizado la fórmula de flujo de compuerta sumergida (Manual de referencia técnica SOBEK, 2016):

$$Q = c_w \cdot \mu \cdot A \cdot \sqrt{2g(h_{up} - h_{do})}$$

Donde Q = descarga a través de la compuerta, c_w = coeficiente de contracción, μ coeficiente de contracción lateral, A = área de flujo



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



húmedo, g = constante gravitacional ($=9.81\text{m}^2/\text{s}$), h_{up} = nivel aguas arriba y h_{do} = nivel aguas abajo.

Para paso en el tiempo T , lo anterior resulta en:

$$Q_{Total,T} = [c_w \cdot \mu]_{Total,T} \cdot A_{Total,T} \cdot \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})}$$

Donde $Q_{total,T}$ = descarga total a través de las 3 compuertas en el tiempo T , $[c_w\mu]_{Total,T}$ = coeficiente de descarga y coeficiente de contracción lateral combinado para el tiempo T , $A_{Total,T}$ = área de flujo húmedo total en el tiempo T de las tres compuertas, h_{ar} = nivel de agua aguas arriba y $h_{ab,T}$ = nivel aguas abajo.

La fórmula anterior se utiliza para calcular el área total de apertura de la compuerta para el tiempo $T+1$ con la siguiente fórmula:

$$A_{Total,T+1} = \frac{[c_w\mu]_{Total,T} \cdot A_{Total,T} \cdot \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})} + (Q_{T+1} - Q_T)}{[c_w\mu]_{Total,T+1} \cdot \sqrt{2g(h_{up,T+1} - h_{do,T+1})}}$$

Para calcular esta área, los coeficientes de contracción, los niveles reales de agua y las descargas y el nivel de agua objetivo y la descarga objetivo deben ser medidas directamente o definidas indirectamente. Por supuesto, la configuración real de la compuerta es conocida por el sistema.

Niveles de agua

Los niveles de agua aguas arriba ($h_{up,T}$) y aguas abajo ($h_{do,T}$) de las compuertas serán medidos por medio de estaciones automáticas ubicadas en la derivación (no muy cerca de las compuertas). Al medir cada 3 minutos el nivel de agua será posible obtener una buena estimación del nivel de agua real basado en las mediciones en la última hora. Será vital excluir los valores atípicos y el promedio.

Para los niveles de agua en el paso en el tiempo $T+1$ se utilizará el nivel de agua objetivo propuesto en el lado aguas abajo ($h_{do,T+1}$). Para el nivel

de agua aguas arriba ($h_{up,T=1}$) se supone que este nivel de agua no cambiará en 1 hora:

$$h_{up,T+1} = h_{up,T}$$

Descargas

Se puede calcular tanto la descarga Q_{T+1} como Q_T en base al nivel de agua real (H_T) y objetivo (H_{T+1}) aguas abajo de las compuertas de Calamar y la relación derivada entre el nivel de agua h_{do} y la descarga Q_{Total} a través de las tres compuertas en ese sitio (véase también **iError! No se encuentra el origen de la referencia.):**

$$Q_{Total} = -0.03253 \cdot h_{do}^6 + 1.06889 \cdot h_{do}^5 - 13.42052 \cdot h_{do}^4 + 81.40033 \cdot h_{do}^3 - 228.05435 \cdot h_{do}^2 + 338.24056 \cdot h_{do} - 174.18218$$

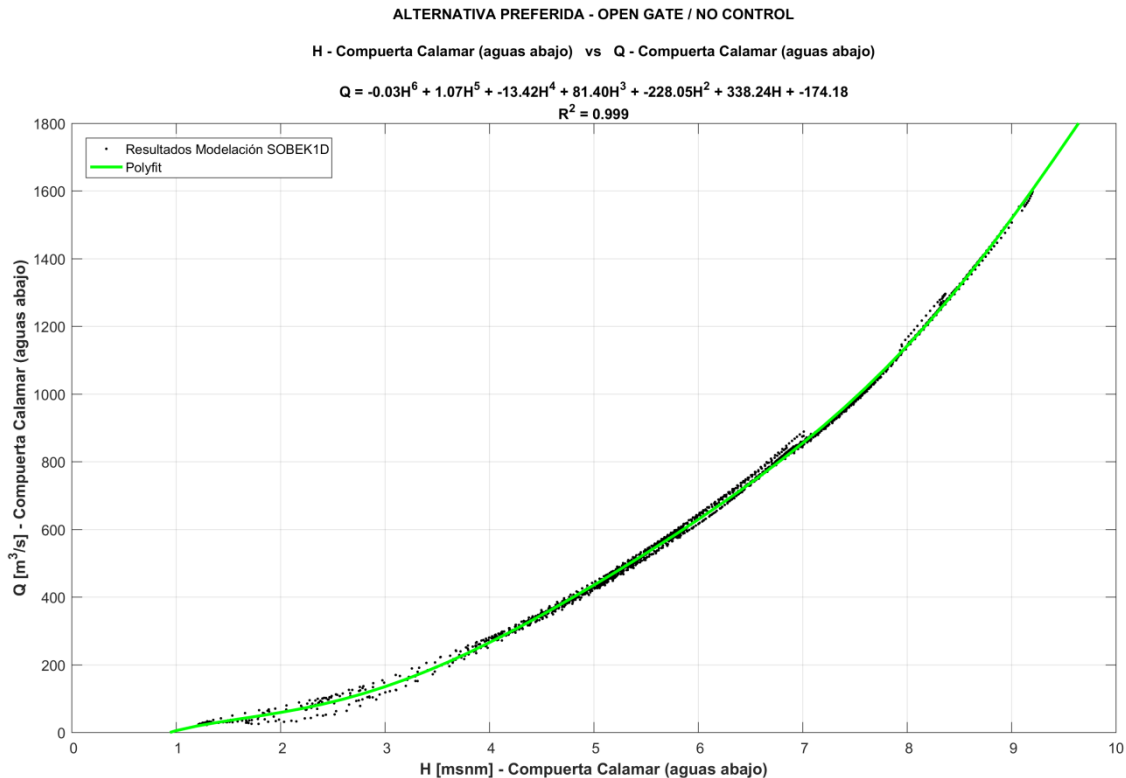




Figura 22 Relación entre el nivel de agua y la descarga justo aguas abajo de las compuertas de Calamar

Coeficientes de contracción

Los coeficientes de contracción c_w y μ pueden cambiar bajo diferentes condiciones (por ejemplo, diferencias de nivel de agua altas o bajas, número de compuertas). Están disponibles varias tablas en la literatura para definir las para una sola compuerta bajo ciertas condiciones

Para este sistema de control, no se darán estos coeficientes, sino que se derivarán en cada paso de tiempo T de la configuración de la compuerta, el nivel de agua medido aguas arriba y aguas abajo de la compuerta y la descarga derivada (mencionada anteriormente). Posteriormente se supone que estos coeficientes no cambiarán significativamente en la siguiente hora hasta el momento $T+1$.

$$[c_w\mu]_{Total,T+1} = [c_w\mu]_{Total,T} = \frac{Q_{Total,T}}{A_{Total,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})}}$$

Resultados de la apertura total de la compuerta de las tres compuertas

La nueva configuración de la compuerta para el paso en el tiempo $T+1$ se puede definir basándose en:

$$A_{Total,T+1} = \frac{A_{Total,T} [c_w\mu]_{Total,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})} + (Q_{T+1} - Q_T)}{[c_w\mu]_{Total,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,Target})}}$$

Donde:

$$[c_w\mu]_{Total,T} = \frac{Q_{Total,T}}{A_{Total,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})}}$$

$$Q_{Total} = -0.03253 \cdot h_{do}^6 + 1.06889 \cdot h_{do}^5 - 13.42052 \cdot h_{do}^4 + 81.40033 \cdot h_{do}^3 - 228.05435 \cdot h_{do}^2 + 338.24056 \cdot h_{do} - 174.18218$$



El procedimiento de ajuste de la compuerta solo se iniciará cuando el nivel de agua medido se desvíe a más de 5 cm del nivel de agua objetivo, lo que reducirá drásticamente el número de ajustes de la compuerta durante un día.

Ajustes de compuertas individuales de las tres compuertas

Para las situaciones con descargas bajas a través de las compuertas y una alta diferencia de nivel de agua entre aguas arriba y aguas abajo, solo será necesario un pequeño área de flujo abierto, razón por la cual se elige utilizar 1 o 2 compuertas en lugar de las 3 compuertas para estas condiciones. Esto hace posible el control con mayor precisión.

Resultado: Cuando se necesita aumentar la apertura total de las tres compuertas para dejar entrar más agua al sistema, la primera compuerta A se abrirá hasta 1 metro, seguida por la compuerta B y después la compuerta C. Cuando todas las compuertas tengan aberturas de 1 metro, las tres compuertas se abrirán más, igualmente, hacia el mismo nivel de compuerta uniforme. Cuando se necesite bajar el nivel de agua (y por lo tanto el flujo de entrada), esta serie de apertura se invertirá. Por lo tanto, si el área de flujo es todavía mayor de 60 m² todas las compuertas se bajarán por igual y simultáneamente. Si la nueva área total es inferior a 60 m², 40 m² o 20 m², respectivamente, se bajará la compuerta C, B o A. La Tabla 4 muestra cómo se calculan las nuevas alturas de la compuerta (parámetro d). Si las nuevas alturas de la compuerta son superiores al nivel del agua aguas arriba más 20 cm, deberán ajustarse las alturas de la compuerta a 20 cm por encima del nivel del agua aguas arriba. En todo caso, la altura de la compuerta no puede ser superior a +7,25 msnm.

Los ajustes de la compuerta se obtienen mediante restar las alturas actuales de la compuerta de estas nuevas alturas de la compuerta. Es importante señalar que la numeración de la compuerta no está relacionada con una abertura de compuerta predeterminada. La compuerta A corresponde a la abertura de la compuerta que se utiliza para el flujo base. Sin embargo, cada 6 meses, el gestor de control de agua asigna la apertura de la compuerta como la compuerta de flujo base. Esto se hace para distribuir igualmente la carga y el uso de las



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



tres compuertas. La compuerta B es siempre una abertura de compuerta adyacente a la compuerta A. La compuerta C corresponde a la abertura de compuerta que permanece cerrada de última durante el procedimiento de apertura a lavado y debe cerrarse completamente primero en el procedimiento de cierre a base de flujo. El procedimiento se explica con más detalle y con ejemplos en el Apéndice 2. La Figura 22 muestra el diagrama de flujo que se debe seguir para obtener las alturas de compuerta correctas.

Tabla 4: Procedimiento para calcular las nuevas alturas de compuerta individuales basadas en el área de apertura total.

Condición de área total	$d_{gateA,T+1}$	$d_{gateB,T+1}$	$d_{gateC,T+1}$
$if A_{Total,T+1} \leq 1.0 \times W_{gate1}$	$\frac{A_{Total,T+1}}{W_{gateA}}$	0.00 m	0.00 m
$elseif A_{Total,T+1} \leq 1.0 \times \sum_{X=A}^B W_{gateX}$	1.00 m	$\frac{A_{Total,T+1} - 1.0 \times W_{gateA}}{W_{gateB}}$	0.00 m
$elseif A_{Total,T+1} \leq 1.0 \times \sum_{X=A}^C W_{gateX}$	1.00 m	1.00 m	$\frac{A_{Total,T+1} - 1.0 \times (W_{gateA} + W_{gateB})}{W_{gateC}}$
else	$\frac{A_{Total,T+1}}{\sum_{X=A}^C W_{gateX}}$	$\frac{A_{Total,T+1}}{\sum_{X=A}^C W_{gateX}}$	$\frac{A_{Total,T+1}}{\sum_{X=A}^C W_{gateX}}$

Debido a que $W_{gate,A} = W_{gate,B} = W_{gate,C} = 20m$, las fórmulas se simplifican drásticamente a:

Condición de área total	$d_{gateA,T+1}$	$d_{gateB,T+1}$	$d_{gateC,T+1}$
$if A_{Total,T+1} \leq 20m^2$	$\frac{A_{Total,T+1}}{20}$	0.00 m	0.00 m
$elseif A_{Total,T+1} \leq 40m^2$	1.00 m	$\frac{A_{Total,T+1} - 20}{20}$	0.00 m
$elseif A_{Total,T+1} \leq 60m^2$	1.00 m	1.00 m	$\frac{A_{Total,T+1} - 40}{20}$
else	$\frac{A_{Total,T+1}}{60}$	$\frac{A_{Total,T+1}}{60}$	$\frac{A_{Total,T+1}}{60}$

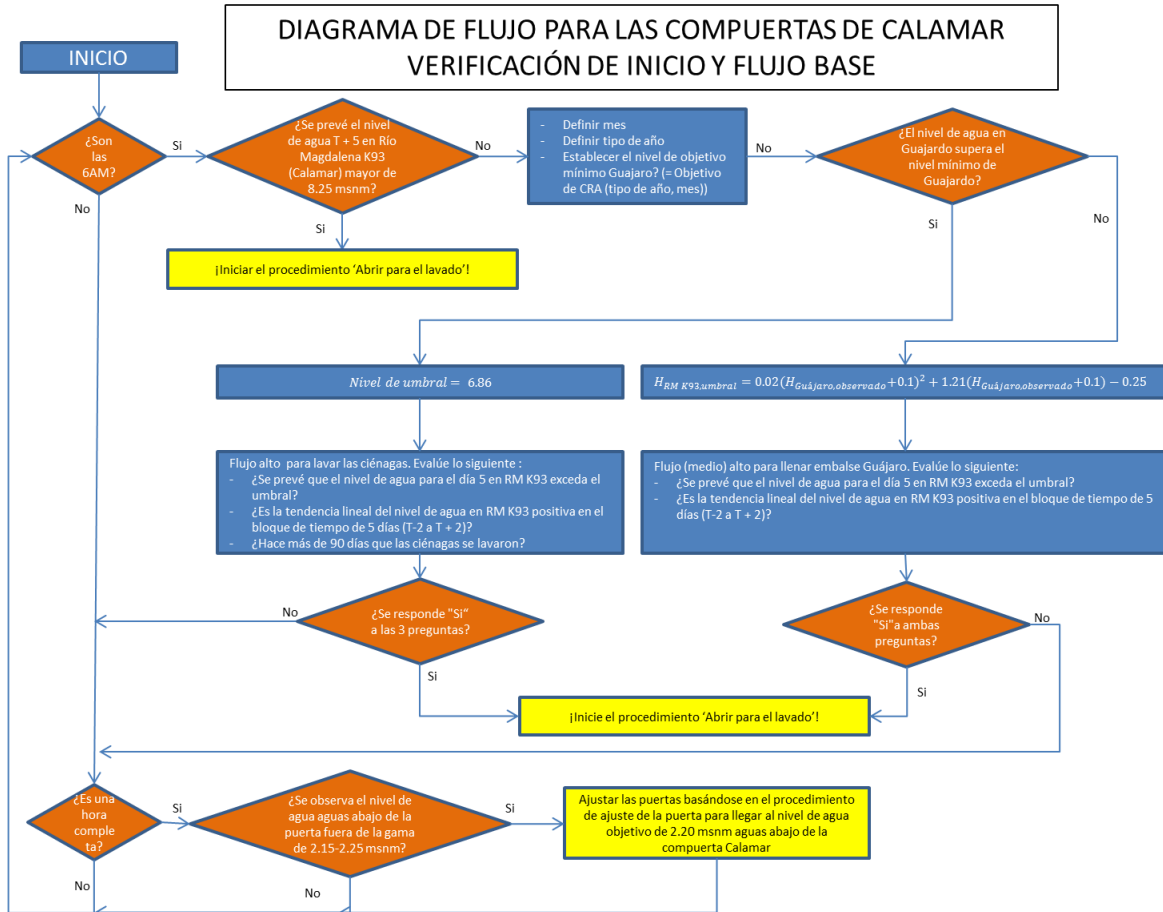


Figura 23. Diagrama de flujo del procedimiento de "Ajuste de Compuerta" para las compuertas de Calamar

Mantenimiento

La situación del flujo base es la situación de flujo en donde se puede realizar el mantenimiento y reparación de las Compuertas de Calamar. En el lado aguas arriba de la estructura de la compuerta, hay un Puente de tres vanos que permite el acceso a la isla del medio en donde se ubica el centro de control. El Puente también provee acceso para instalar o reemplazar (con una grúa móvil) los cilindros de las torres de izado, equipo mecánico en las salas de instalación junto al puente y mover el estante manatí (*manatee rack*) e instalar los *stop logs* aguas

arriba del puente (ver Figura 24). Durante el flujo base, estos *stop logs* se pueden usar para aislar una apertura de compuerta del lado aguas arriba y abajo, bombear el agua afuera y realizar mantenimiento y reparación.

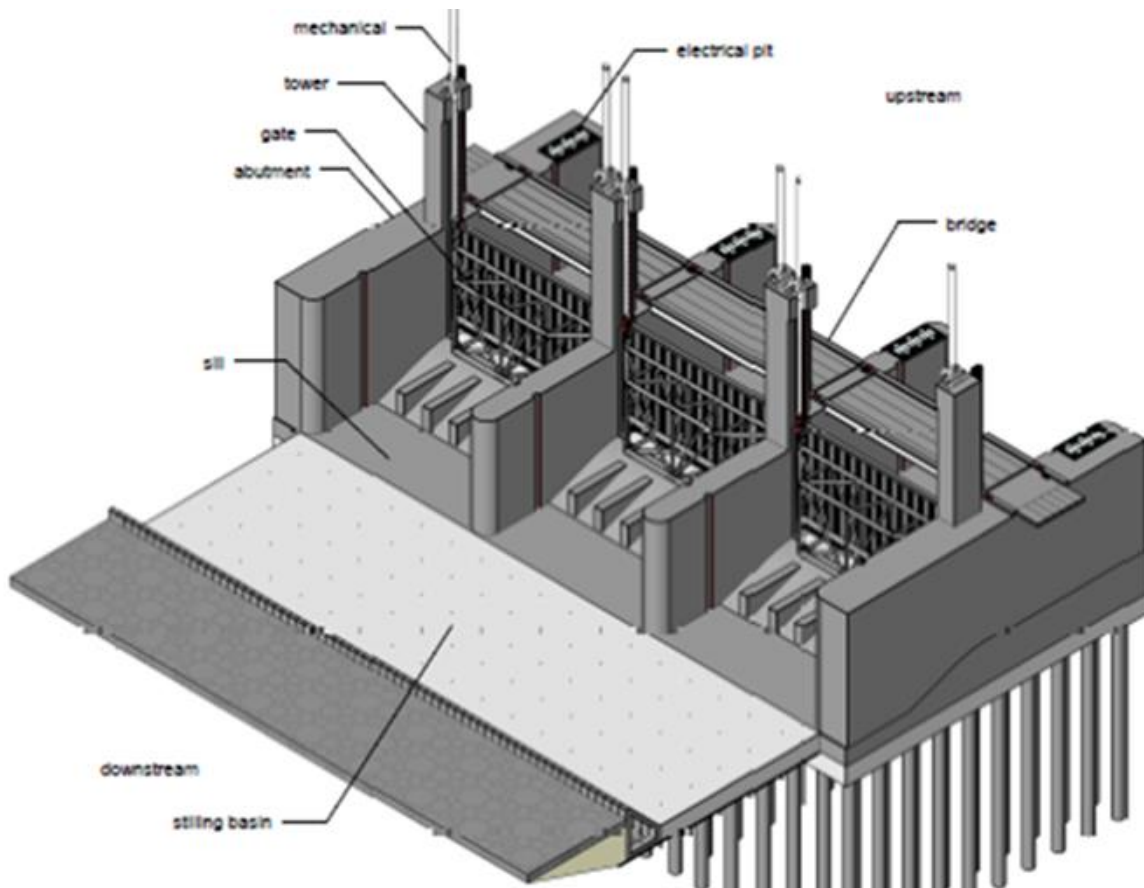


Figura 24. Panorama de los componentes de las compuertas de Calamar

5.4.2 Flujo base

Durante el período más largo durante el año no hay onda de inundación presente en el Río Magdalena. De modo que las operaciones de apertura y cierre de la compuerta de Calamar están esperando un nivel de agua lo suficientemente alto disponible en el Río Magdalena. Siempre que la apertura aún no haya comenzado, se debe mantener el nivel de agua



mínimo requerido (y profundidad del agua) en el Canal Del Dique, manteniendo así un régimen de flujo base en el Canal del Dique para reducir el transporte de sedimentos y el flujo de agua dulce a la zona costera, mientras se mantiene una profundidad de agua mínima para la navegación.

Parámetro de Control

Las compuertas de Calamar controlan la descarga que entra al Canal y así también los niveles de agua en el Canal del Dique. El nivel de agua aguas abajo de las compuertas de Calamar está vinculado a los niveles de agua a lo largo de toda la longitud del Canal (las relaciones se basan en el modelo hidráulico validado del Canal del Dique). Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas relaciones no son necesariamente exactas en la práctica, ya que pueden ocurrir extracciones de agua (salida) y adiciones de aguas pluviales (entrada), independientemente de la configuración de la compuerta de Calamar, lo que puede influir en los niveles de agua en el CDD.

Un nivel mínimo de 2,05 msnm aguas abajo de las compuertas en Calamar corresponde a un nivel de agua que se excede el 95% del año y que se utiliza como un límite en el que debe ser posible la navegación. Este nivel ha sido elegido como el nivel mínimo de agua durante las condiciones de flujo base. Este nivel de agua se utiliza como punto de partida para ver si la línea de agua a lo largo de todo el CDD proporciona suficiente profundidad de agua para la navegación. Este nivel de agua corresponde a una descarga de alrededor de 60-70 m³/s.

Se ha realizado un ejercicio para analizar si es mejor utilizar el nivel de agua medido como un parámetro de control o la descarga (entrada en el Canal) que se puede medir mediante el uso de H-ADCP aguas arriba de las compuertas de control. Ambos métodos tienen sus ventajas y desventajas. Los factores importantes son:

- **Precisión:** La medición tanto del nivel de agua como de la descarga incluirá ruido y valores extremos (debido al paso de convoyes, plantas de agua, etc.). Cada hora y cada día se tomará una nueva decisión basada en las mediciones. Cuando los



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



- parámetros se miden cada 5 minutos y se analizan, resulta muy fácil olvidar cualquier valor extremo y hacer un promedio de la señal.
- Relación entre descarga y nivel de agua: Esta relación se ha definido a partir de simulaciones de modelos hidráulicos y se utilizan para traducir los niveles objetivo en descargas objetivo. Esta traducción crea incertidumbres, introducidas por la histéresis en toda la gama y los cambios dentro del sistema como la entrada de agua (lluvia) y la extracción.
 - Solución de respaldo: En caso de mal funcionamiento de las estaciones de medición del nivel de agua es posible cambiar hacia las lecturas manuales de los limnómetros
 - . En caso de mal funcionamiento de los H-ADCP no será posible medir directamente las descargas.

Basándose en los tres aspectos anteriores, se ha elegido utilizar los niveles de agua medidos como parámetros de control. El ruido y los valores extremos pueden ser excluidos usando mediciones suficientes, procesamiento de señal adecuado y la inclusión de una banda de incertidumbre. Mediante el uso del nivel de agua como parámetro de control, el sistema de control utiliza un único parámetro que también se puede medir fácilmente manualmente en caso de mal funcionamiento de medidores automáticos.

Como se mencionó anteriormente, se pueden esperar pequeñas fluctuaciones del nivel de agua alrededor del perfil de profundidad de agua mínimo. Por lo tanto, se utilizará un nivel de agua de 2,20 msnm como nivel de control para el flujo base. Esto es 15 cm más alto que el nivel mínimo de agua necesario para la navegación.

A lo largo del Canal se deben analizar las variaciones de nivel de agua en las estaciones automáticas de nivel de agua para ver si los niveles de agua observados exceden siempre los niveles mínimos de agua. Estas estaciones medidoras monitorean el nivel de agua en KMR 9 (salida Canal Viejo), KMR 12 (entrada Hobo), KMR 18 (San Cristóbal), KMR 19,5 (salida Hobo), KMR 25 (El Porvenir), KMR 31 (Villa Rosa) , KMR 38 (entrada Capote y Luisa), KMR 52 (Mahates), KMR 82 (Santa Helena) y KMR 94 (aguas arriba de Puerto Badel). Con base en este análisis se



puede concluir que si se puede permitir un nivel de agua de flujo base inferior en el sistema CDD sin tener variaciones de nivel de agua esto puede poner en peligro la navegación.

Control de las compuertas de Calamar

Cada hora se comprueba si el nivel de agua observado aguas abajo de la compuerta de Calamar está fuera del rango aceptado de 2,15 a 2,25 msnm. En caso de que el nivel de agua observado esté fuera de este rango, la compuerta se ajustará para obtener el nivel objetivo de agua de 2,20 msnm. La medición del nivel del agua y la compuerta están cerca entre sí, por lo que cualquier ajuste de la compuerta afectará inmediatamente la descarga medida. No se realizarán ajustes de compuerta hasta el siguiente chequeo por hora que encuentre un nivel de agua observado que esté fuera del rango aceptado. Los ajustes de la compuerta se calculan mediante el procedimiento de 'Ajuste de la compuerta' (véase el numeral 5.4.1).

Las 11 estaciones de medición del nivel de agua mencionadas anteriormente se utilizan para verificar que los niveles de agua en esos lugares son realmente más altos que su nivel mínimo de agua respectivo. Si un nivel de agua es inferior a este nivel mínimo de agua, el sistema SCADA debe proporcionar una advertencia. A este respecto, debe tenerse cuidado para excluir el descenso del nivel de agua a corto plazo durante el paso de los remolques de empuje a lo largo de los medidores (que pueden llegar a ser de varios decímetros durante, digamos, 1 minuto). El equipo en el edificio de control en Calamar puede ajustar la configuración de la puerta o aumentar el nivel de agua objetivo en caso de que los niveles de agua en el canal sean demasiado bajos por un período más largo debido a, por ejemplo, extracciones de canal.

Verificación y respaldo

En el primer período después del funcionamiento completo del sistema CDD, la relación entre la descarga a través de las compuertas y el nivel del agua aguas abajo de las compuertas debe ser verificada y posiblemente recalibrada y actualizada dentro del SCADA.



5.4.3 Procedimiento de lavado: control de inicio

Diariamente, a las 6 a.m., se realiza el control para ver si se necesita iniciar el procedimiento de lavado (apertura más allá del flujo base) debido a un evento de flujo alto próximo. La primera verificación es comprobar si el nivel de agua pronosticado en Calamar (sin efecto de remanso) en 5 días excede los 8,25 msnm. De ser así, el procedimiento de "Abrir a lavado" (véase el párrafo siguiente) se inicia de inmediato para aliviar los niveles de las inundaciones en el área del Río Magdalena entre Calamar y Barranquilla.

Si este nivel de agua no se supera en los 5 días siguientes a las predicciones a las 6 a.m. de cada día (en que está activo la verificación de iniciación), el tipo climático y mensual (véase fuente Universidad de Colombia) es verificado por el sistema SCADA para que se pueda derivar la meta mínima de nivel del embalse de Guájaro (véase Figura 16).

Lavado para llenar Guájaro

Si el nivel de agua en Guájaro en ese momento no excede el nivel objetivo mínimo entonces la apertura de la compuerta para llenar Guájaro sería favorable. El nivel de umbral que se necesita en Calamar para llenar Guájaro debe ser calculado usando el nivel observado en Guájaro y la corrección del efecto de remanso en base al nivel de agua real en Calamar (en el Río Magdalena):

$$H_{RM\ K93,threshold} = 0.017374(H_{Guajaro,observed} + 0.1)^2 + 1.210289(H_{Guajaro,observed} + 0.1) - 0.251373.$$

La derivación de esta relación se explica en el párrafo 5.3.2. Después de definir el nivel de umbral, se deberían verificar dos criterios:

- El nivel de agua pronosticado en RM K93 en 5 días (T+5) excede el nivel de umbral?
- La tendencia lineal del nivel de agua en RM K93 es positiva en el bloque temporal de 5 días dos días antes (T-2) hasta dos días



después (T+2) el día actual (así que la tendencia lineal es de 5 días)?

Los niveles de agua pronosticados (requeridos para calcular la tendencia lineal) deben ser corregidos a niveles realistas. Esta corrección se discute en el párrafo 6.2.3 y usa el nivel de agua real (pre-proyecto), que es calculado por un modelo de regresión, y el nivel de agua en Incora para obtener una corrección adecuada. Si el nivel de umbral es excedido y la tendencia lineal es positive, entonces se debería iniciar el procedimiento 'abrir para el lavado' de las compuertas de Calamar (ver siguiente párrafo). Si este no es el caso, entonces el plan sigue para verificar cada hora el flujo base a través de la compuerta (ver párrafo previo). Al día siguiente a las 6AM el control de iniciación de evalúa nuevamente.

Lavado para llenar las ciénagas

Si el nivel de agua en Guájaro a las 6AM excede el nivel objetivo mínimo de Guájaro, entonces no se requiere la apertura para llenar Guájaro. En ese caso, otra razón para lavar el Sistema CDD es que se pueden lavar las ciénagas. Se necesita otro nivel de umbral en el Río Magdalena (K93) para obtener un nivel de agua en el Sistema CDD de modo que los diques fijos de las ciénagas empiecen a desbordarse. Este umbral se fija en 6.86 msnm (ver párrafo 5.3.2). Entonces, se deben verificar tres criterios:

- El nivel de agua pronosticado en RM K93 en 5 días (T+5) excede el nivel de umbral?
- La tendencia lineal del nivel de agua en RM K93 es positiva en el bloque temporal de 5 días dos días antes (T-2) dos días después (T+2) el día actual (así que la tendencia lineal es de 5 días)?
- Ha sido hace más de 90 días que se lavaron las ciénagas?

Duración óptima entre los pulsos

El último criterio se introduce para evitar altas descargas consecutivas en un año de La Niña, que afecta el ecosistema marino de manera



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



negativa. Sin este criterio, durante un tiempo prolongado de agua alta en el Río Magdalena, se podría generar otro pulso inmediatamente después de un pulso de inundación en el Sistema CDD. Esto no tendría ninguna necesidad ecológica para el ecosistema de las ciénagas (dado que el lavado y la migración de peces ya sucedieron durante el primer pulso) y tampoco la necesidad de llenar Guájaro (actualmente llena). En base al tiempo promedio entre los pulsos naturales que ocurren alrededor de junio y noviembre, se ha establecido un período mínimo de 90 días entre pulsos. Durante estos 90 días, los peces que migraron a las ciénagas durante el primer pulso, se pueden alimentar durante el pico principal de producción durante y después del pulso. Durante un siguiente pulso posible, los peces migratorios adultos, como el bocachico, pueden migrar fuera del Sistema para reproducirse mientras que los peces jóvenes serán descargados en el sistema CDD para permanecer en las ciénagas hasta el siguiente pulso para que crezcan. Este pulso también recarga los nutrientes de las ciénagas que han sido borrados en gran medida durante el período de 90 días, y estimula la producción principal nuevamente.

Si las tres preguntas tienen respuestas positivas, el procedimiento de 'abrir para el lavado' de las compuertas de Calamar debería ser iniciado (ver siguiente párrafo). Si este no es el caso, entonces el esquema continúa con la verificación horaria de la descarga del flujo base a través de la compuerta. El día siguiente a las 6AM, la verificación de inicio para la apertura adicional de la compuerta de Calamar se evalúa nuevamente. El diagrama del flujo base y procedimientos de 'verificación de inicio' discutido en los párrafos 5.4.1 y 5.4.2 se muestra en la Figura 25.

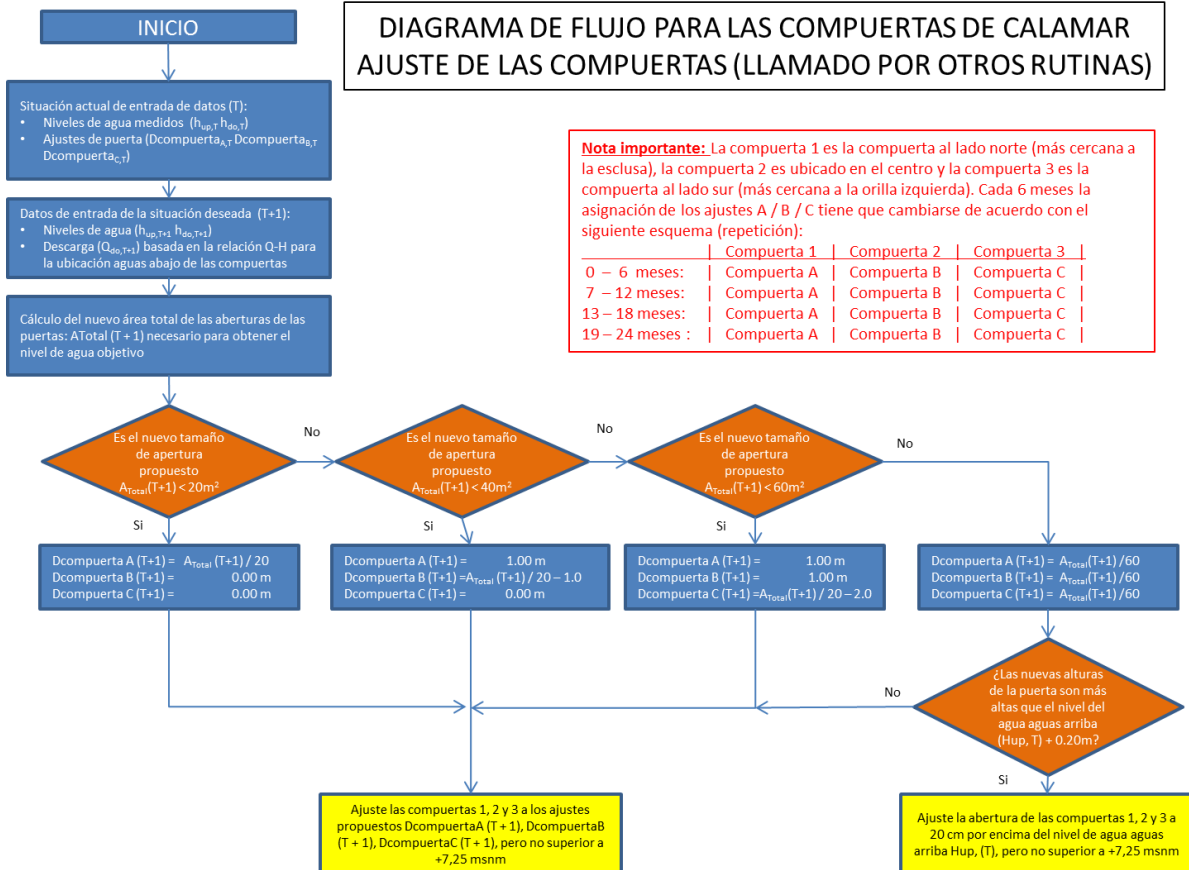


Figura 25. Diagrama de flujo para la operación de flujo base de las compuertas de Calamar y la verificación de inicio para la apertura de las compuertas

5.4.4 Procedimiento de lavado: abrir para el lavado

Una vez que el esquema diario de 'Verificación de iniciación y flujo base' (Figura 25) ha identificado que se debe iniciar el procedimiento de "Abierto a lavado", se sigue un nuevo esquema de control de agua para abrir más las compuertas de Calamar para el lavado (véase Figura 28). Cada hora deben comprobarse tres criterios para ver si se necesita más apertura de la compuerta o que las compuertas alcanzaron una altura suficiente:



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



- ¿Es la altura de las compuertas +7,25 msnm y por lo tanto está totalmente abierta?
- ¿Es la altura de la compuerta 20 cm más alta que el nivel de agua en la compuerta?
- ¿Está el nivel del agua aguas abajo de las compuertas de Calamar +7.15 msnm o más alto?

Si responde "sí" a al menos una de estas preguntas, se inicia el procedimiento provisional. Si este no es el caso, entonces se recomienda la apertura (adicional) de la compuerta.

Se define el nivel de agua objetivo para cada hora en base al incremento de 4 cm/hora aguas abajo de las compuertas de Calamar. Se verifica si el nivel de agua observado es menor que el nuevo nivel de agua objetivo para esa hora. Si este no es el caso, el aumento del nivel de agua en el Río Magdalena ya causó un aumento suficiente de la descarga (sin el funcionamiento de las compuertas) y, por lo tanto, un aumento suficiente del nivel de agua en el lado aguas abajo de las compuertas. No se debe aumentar la altura de la compuerta en este caso. Sin embargo, esta opción no es probable, ya que el mayor aumento en el nivel de agua en el Río Magdalena es de 1,6 cm/hora. Una hora más tarde, el esquema será seguido de nuevo, comenzando con la evaluación de los tres criterios para detener o continuar.

Si el nivel de agua observado aguas abajo de la compuerta es menor que el nivel de agua objetivo para esa hora, la altura de la (s) compuerta (s) se ajustará, de manera que se alcance el nivel de agua deseado. Todos los ajustes de la compuerta se calculan mediante el procedimiento de 'Ajuste de la compuerta' (véase el numeral 5.4.1). Una hora más tarde, se seguirá de nuevo el esquema de apertura comenzando con la evaluación de los tres criterios para detener o continuar.

Es probable que el ajuste de la compuerta sea pequeño (del orden de los centímetros) cuando las compuertas estén casi cerradas, pero es probable que esté en el orden de decímetros cuando las compuertas están casi fuera del agua. Esto no es un problema, ya que las



compuertas de Calamar pueden funcionar con una velocidad de 0,5 cm/segundo o 30 cm/minuto. Ajuste horario de la puerta.

Al comienzo de la apertura (adicional) de las compuertas de Calamar solo se abre una compuerta. Solo se ajusta esta compuerta al nivel de agua objetivo, pero no más allá de una abertura de compuerta de 1 metro (por lo tanto +0 msnm). Entonces, si se aconseja un área de flujo mayor, se debe usar una segunda compuerta adyacente para permitir que entre más agua al sistema e incrementar el nivel del agua. De nuevo, esta compuerta se abrirá hasta un nivel de +0.0 msnm (apertura de 1 metro) siempre que no se alcance el nivel de agua objetivo. Cuando la segunda compuerta haya alcanzado una altura de compuerta similar a la primera compuerta y se recomienda una apertura adicional, la segunda compuerta permanece en la misma posición y se ajusta una tercera compuerta adyacente hasta que se alcanza el nivel de agua objetivo. Esta tercera compuerta se ajusta hasta que alcanza la misma altura que la primera y la segunda compuerta (así +0 msnm). Entonces, si el nivel objetivo del agua necesita ser más alto, la altura de la compuerta de las 3 compuertas se ajusta uniformemente. Las compuertas no se elevarán a una altura superior a +7,25 msnm, ya que con esta altura se producirá un flujo libre completo incluso durante los flujos de máximo pico cuando el nivel de agua aguas abajo de las compuertas es de alrededor de 7,10 msnm. El ajuste de la compuerta puede ser pequeño en el orden de 1 a 3 cm e incluso puede ser cero durante algunas horas, debido al intervalo de error y al pequeño cambio requerido en la descarga por hora. Cuando las compuertas están situadas a un nivel más alto, es probable que el ajuste de la compuerta sea del orden de los decímetros.

El diagrama de flujo del procedimiento de "Abierto a lavado" que se aborda en este numeral se ilustra en la Figura 26.

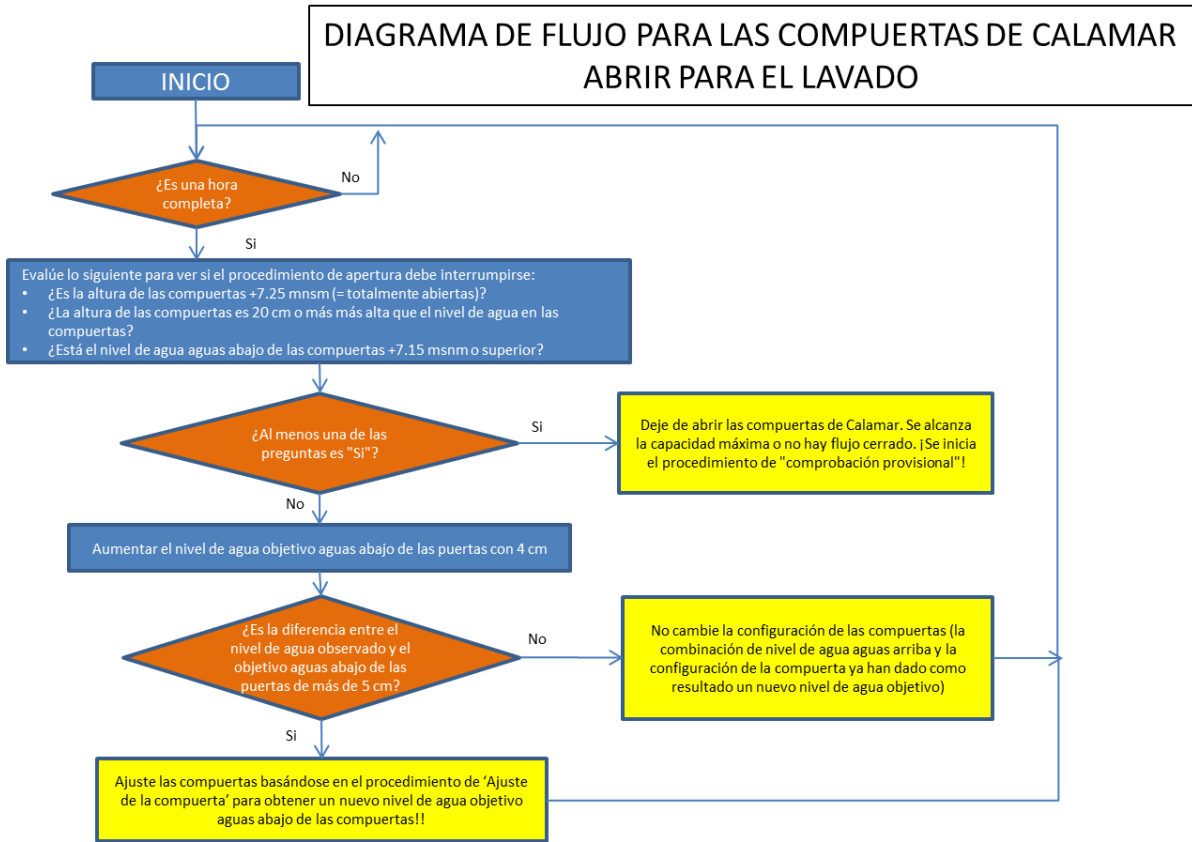


Figura 26. Diagrama de flujo para la apertura adicional de las compuertas de Calamar para el lavado

5.4.5 Procedimiento de lavado: verificación provisional

El procedimiento de 'Verificación provisional' se inicia una vez que las compuertas de Calamar están suficientemente abiertas porque se alcanza la capacidad máxima de descarga requerida o porque las compuertas se sacan completamente del agua. Este procedimiento garantiza que la altura de la compuerta se ajuste a niveles de agua variables, que no se exceda la capacidad máxima requerida y verifica los criterios para iniciar el cierre de la compuerta de Calamar.

Mientras el procedimiento de 'Verificación provisional' esté activo, se realizará una comprobación por hora. Cada hora se comprueba si el nivel de agua observado aguas abajo de las compuertas de Calamar



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



está fuera del rango de 7,10-7,20 msnm que es el nivel de agua objetivo de 7,15 msnm \pm 5cm. Este es el nivel máximo de agua que se permite entrar en el sistema CDD, ya que la nueva conexión entre el Canal y las ciénagas no está diseñada en base a niveles de agua y descargas mucho más altas. Si el nivel de agua observado está dentro del rango, no se ejecuta ningún ajuste de compuerta. De lo contrario, la altura de las tres compuertas debe ajustarse para llegar al nivel de agua objetivo en el lado aguas abajo de las compuertas.

Durante la 'Verificación provisional', las compuertas permanecerán elevadas 20 cm por encima del nivel del agua aguas arriba hasta un máximo de 7,25 msnm. De esta manera el agua puede fluir libremente, pero también será posible cerrar la compuerta y reducir el flujo rápidamente. Entre los niveles de agua de +7,05 msnm y +7,25, el espacio disponible entre la punta de la compuerta y el nivel del agua será, por lo tanto, inferior a 20 cm. Todos los ajustes de compuerta se calculan mediante el procedimiento de 'Ajuste de la compuerta' (véase el numeral 5.4.1).

Todos los días a las 6 a.m. cuando el procedimiento de 'Verificación provisional' esté activo, un nuevo umbral en el Río Magdalena (R93) se deriva en base al nivel real de agua en Guájaro. Además, el nivel objetivo mínimo de Guájaro debe ser verificado con base en el mes y el tipo de clima. Ahora, se deben revisar tres criterios:

- ¿Se responden positivamente las siguientes tres sub-preguntas?
 - ¿Es el nivel de agua observado en Guájaro inferior o igual al nivel objetivo mínimo +0.15 m?
 - ¿Es el nivel de agua observado en RM K93 inferior al nivel umbral?
 - ¿Es la tendencia lineal del nivel de agua en RM K93 negativa en el bloque de tiempo de 5 días dos días antes (T-2) hasta dos días después (T+2) en el día actual (así que es una tendencia lineal de 5 días)?
- ¿Se responden positivamente las siguientes dos sub-preguntas?
 - ¿Es el nivel de agua observado en Guájaro más alto que el nivel objetivo mínimo +0.15 m?



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



- ¿Son todos los niveles de agua pronosticados en RM K93 de T+1 a T+5 inferiores a 6,86 msnm?
- ¿Se responden positivamente las siguientes dos sub-preguntas?
 - ¿Se han lavado los ciénagas durante 50 días o más?
 - ¿Son todos los niveles de agua pronosticados en RM K93 de T+1 a T+5 inferiores a 8.25 msnm?

El primer criterio inicia el cierre de las compuertas de Calamar cuando Guájaro aún no está lleno hasta su nivel deseado, pero cuando no hay suficiente nivel de agua para continuar llenando el embalse. El segundo criterio inicia el cierre de las compuertas de Calamar cuando se llena el Guájaro a su nivel deseado y no se espera que los niveles de agua sean lo suficientemente altos para lavar las ciénagas. El criterio de parada para Calamar se fija en 15 cm más alto que el nivel objetivo mínimo, por lo que no se aconseja un cierre directamente después de abrir las compuertas. Esto puede ocurrir cuando el nivel del agua en Guájaro fluctúa alrededor del nivel mínimo de agua. En cualquier combinación de mes y tipo de clima un nivel de agua adicional de 15 cm en Guájaro además del nivel mínimo objetivo llevaría a un nivel de agua que no excede el nivel máximo objetivo. El tercer criterio inicia el cierre de las compuertas de Calamar cuando se excede la duración máxima de pulso y cuando los niveles de agua previstos están por debajo de un nivel al cual no es necesario el alivio de inundaciones para el Río Magdalena.

Duración óptima del pulso

El último criterio de la duración del pulso ha sido definido en base al intercambio de agua y la modelación de la calidad del agua. El modelo de la producción primaria muestra que dicha producción se incrementa con más intercambio entre el canal CDD y las ciénagas. El agua de los ríos contiene nitrógeno y fósforo que estimula la producción primaria. El modelo muestra que cuando el intercambio es más de aproximadamente tres veces el volumen de las ciénagas, no ocurre ningún incremento adicional de la producción primaria. En promedio, este es el caso después de 50 días que se considera como el valor óptimo para la duración del pulso en el cual se permite el intercambio



de agua entre el canal y las ciénagas. Durante el pulso, ingresan altas descargas de agua dulce y sedimentos en el delta y el área costera. Los sedimentos y agua dulce con nutrientes contribuyen al desarrollo de los ecosistemas del manglar y de los corchales en el delta, pero también ocasionan sedimentación en los caños y crean altos niveles de agua. En las áreas costeras, el agua dulce, nutrientes y sedimentos tienen principalmente solo efectos negativos. Por consiguiente, el Sistema operativo tiene el objetivo de reducir los pulsos tan pronto se alcancen los objetivos para las ciénagas.

Si una de las tres preguntas principales es positiva, se puede iniciar el procedimiento de cierre de la compuerta de Calamar (ver siguiente párrafo). Si este no es el caso, entonces se continúa con la verificación provisional horaria. El criterio para cerrar las compuertas se evalúa nuevamente al día siguiente a las 6AM.

El diagrama de flujo del procedimiento de 'verificación provisional' que se aborda en este párrafo, se muestra en la Figura 27.

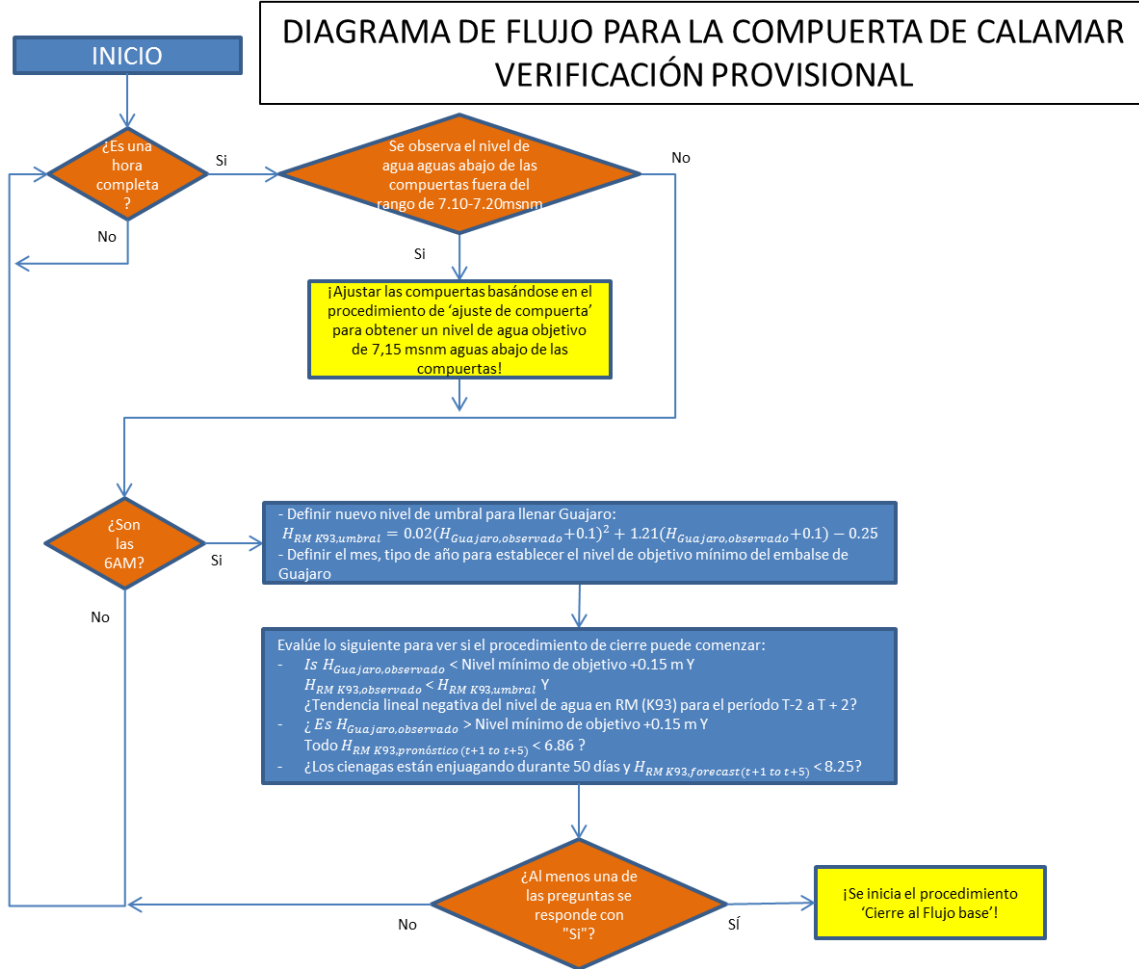


Figura 27. Diagrama de flujo de la verificación provisional durante la apertura de las compuertas de Calamar para el lavado

5.4.6 Procedimiento de lavado: cerrado para el flujo base

Una vez que se inicia el procedimiento de 'Cerrar a flujo base', se inicia un procedimiento similar al proceso de "Abrir para el Lavado". Sin embargo, el procedimiento funciona en dirección opuesta y la disminución del nivel de agua en Incora es menor, siendo 1,3 cm por hora.



Cada hora se debe comprobar si se necesita un cierre adicional de las compuertas o que las compuertas alcanzaron una altura suficiente para la condición de flujo base. Esto se puede hacer comprobando:

- ¿Está el nivel del agua aguas abajo de las compuertas de Calamar +2.20 msnm o más bajo?

Si se responde la pregunta con "sí", se detiene el procedimiento "Cerrar a flujo base". Se establece entonces la compuerta de Calamar a un régimen de flujo base en el que se permite un flujo mínimo en el sistema CDD que lleva al nivel mínimo de agua de 2,20 aguas abajo de las compuertas de Calamar. Se puede seguir el esquema de "Verificación de iniciación y flujo base" (véase Figura 25)) para obtener más instrucciones de manejo del control de agua. Si se responde negativamente a la pregunta, se requiere un cierre adicional de las compuertas.

El cierre adicional de las compuertas sigue al descenso del nivel de agua objetivo con 1,3 cm/hora y el ajuste de la configuración de la compuerta de acuerdo con la rutina "Ajuste de la compuerta". De manera similar al procedimiento de "Abierto a lavado", la cantidad de ajuste de la compuerta varía fuertemente dependiendo del nivel de agua aguas abajo de las compuertas, del Río Magdalena y del tipo de flujo que paso por las compuertas. Es probable que sea pequeño el ajuste de la compuerta cada hora (en el orden de los centímetros) cuando las compuertas están casi cerradas, pero es probable que esté en el orden de decímetros cuando las compuertas están casi fuera del agua. Esto no es un problema, ya que las compuertas de Calamar pueden funcionar a una velocidad de 0,5 cm/segundo o 30 cm/minuto.

Si el nivel de agua observado aguas abajo de las compuertas es mayor que el nivel de agua objetivo para esa hora, se ajusta la altura de la (s) compuerta (s), de modo que se alcanza el nivel deseado de agua objetivo. Todos los ajustes de la compuerta se calculan mediante el procedimiento de 'Ajuste de la compuerta' (véase el numeral 5.4.1). Una hora más tarde se seguirá el esquema de cierre comenzando de nuevo con la evaluación de un criterio para detener o continuar.



Ajuste de la compuerta por horas

Al comienzo del cierre (adicional) de las compuertas de Calamar, las 3 compuertas están (parcialmente) abiertas. Siempre que el área total requerida sea mayor de 60 m^2 , las tres compuertas se ajustarán uniformemente a la descarga objetivo. Si la superficie total calculada para el siguiente paso de tiempo llega a ser menor de 60 m^2 , se debe determinar qué compuerta se utiliza eventualmente para el flujo base. En las horas siguientes, la compuerta que está más alejada de la compuerta de flujo base se ajusta al nivel de agua objetivo mientras que las otras compuertas permanecen a una altura de +0 msnm. Cuando esta compuerta está cerrada, solo dos compuertas están abiertas. La compuerta junto a la compuerta de flujo base se cerrará con una velocidad de disminución del nivel de agua de 1,3 cm/hora en el lado aguas abajo de las compuertas de Calamar. Cada hora esta compuerta se ajusta para alcanzar el nivel de agua objetivo en el lado corriente abajo. Después de algunas horas, solo una compuerta estará abierta que se determinó que manejaría el flujo base. Cada hora la altura de esta compuerta se ajusta a la descarga objetivo. Finalmente, el régimen de flujo base está operando y es controlado por una compuerta.

El diagrama de flujo del procedimiento de 'Cierre a flujo base' descrito en este parágrafo se ilustra en la Figura 28.

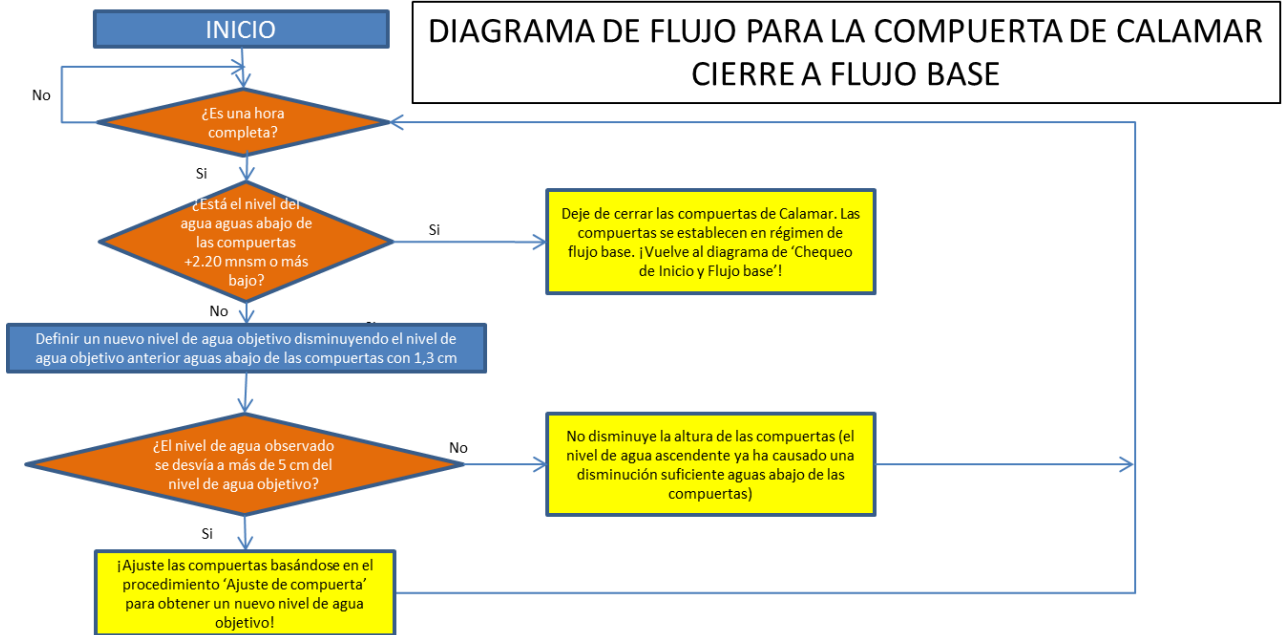


Figura 28. Diagrama de flujo para el cierre adicional de las compuertas de Calamar para el flujo base

5.5 Control operativo del pasaje de peces

Los peces utilizan el paso de peces para nadar río arriba cuando el nivel de agua en el Canal se reduce a niveles de agua bajos, mientras que el nivel de agua en el Río Magdalena es mayor. El paso de peces consta de una entrada aguas abajo y dos salidas para abordar a la variación del nivel del agua aguas arriba en el Río Magdalena. Entre la entrada y la primera salida, que se encuentra en una elevación bastante baja (para niveles de agua medianos en el Río Magdalena), se encuentran 40 escalones (cuencas). Los peces necesitan pasar por 60 escalones para alcanzar la segunda salida que se encuentra más arriba.

El paso de peces tiene dos compuertas: 1) Compuerta de control, 2) Compuerta de inundación. La Figura 29 muestra el diseño base del paso de peces con la ubicación de estas compuertas.

La operación del paso de peces depende únicamente del nivel de agua aguas arriba de Calamar. Los peces pueden migrar a través de la presa



cuando la diferencia de nivel de agua sobre la compuerta es pequeña. Este es el caso cuando los niveles de agua son inferiores a +2,4 msnm (diferencia de 20 cm) y durante los períodos de lavado cuando la compuerta está completamente abierta hasta el nivel del agua. En este caso no necesitan el paso de peces para migrar. Cuando el nivel de agua aguas arriba varía entre 2,4 msnm y 5,0 msnm, se abrirán las dos compuertas del paso de peces. Los peces pueden usar la salida más baja para la migración. A niveles de agua que oscilan entre 5,0 msnm y 7,0, la compuerta de control está cerrada, que cierra de la salida inferior. Ahora los peces solo pueden usar la salida más alta para migrar. Con niveles de agua superiores a 7,0 msnm, la compuerta de inundación está cerrada, lo que hará imposible la migración a través del paso de peces.

Estas dos compuertas son operadas localmente usando un sistema que necesita ser controlado manualmente. Por lo tanto, no están conectados para el control remoto. Sin embargo, el sistema SCADA indicará qué ajuste de compuerta se aconseja en base al nivel de agua aguas arriba.

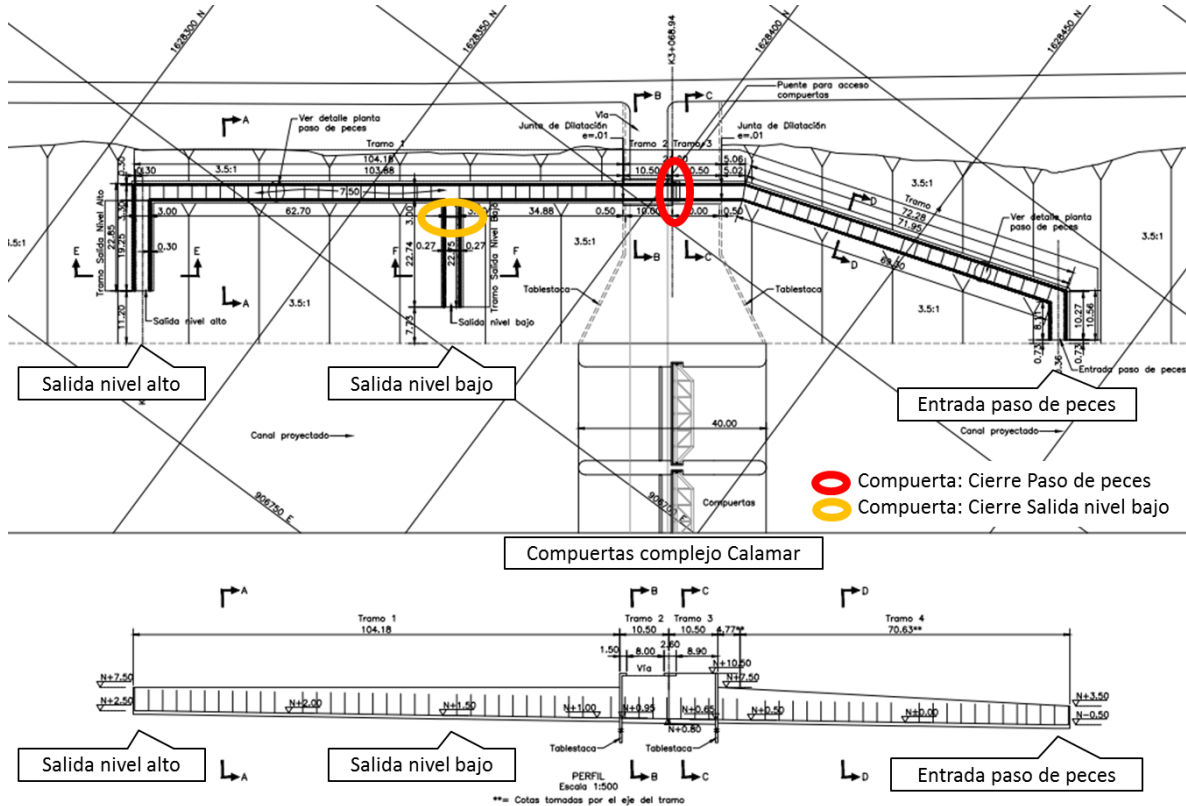


Figura 29. Diseño del paso de peces de Calamar

5.6 Control operativo de las compuertas de El Porvenir

El párrafo 3.4 ya describió brevemente las compuertas de El Porvenir que facilitan la afluencia de agua del sistema CDD al reservorio Guájaro. El reservorio se puede llenar durante las descargas medianas y (a menudo) los picos altos. Cuando los niveles de agua en el Río Magdalena son lo bastante altos, los niveles del Canal en las compuertas de Guájaro subirán hasta 4.5-5.0 msnm durante la descarga pico medio a incluso más alto durante la descarga pico alto. La operación de las compuertas en El Porvenir es tan posible en relación al protocolo actual (CRA, 2012). El esquema del control de agua que se ha creado para las compuertas de El Porvenir (ver Figura 30) converge al nivel objetivo mínimo. En general, las compuertas se cerrarán cuando el nivel en Guájaro está por encima del nivel objetivo mínimo + 15 cm. La afluencia



de agua es facilitada por las compuertas cuando el nivel de agua en Guájaro está por debajo del nivel objetivo mínimo y cuando hay suficiente fuente presente hacia el reservorio.

El esquema del control de agua es una rutina horaria que empieza a determinar el nivel objetivo mínimo de Guájaro usando el mes y el tipo de clima que se aplica al día. Luego se verifica si las compuertas están en posición abierta o cerrada.

Si las compuertas están cerradas se verifica si el nivel de agua en Guájaro supera el nivel objetivo mínimo. Si este es el caso, entonces, las compuertas permanecen cerradas, porque el nivel objetivo mínimo ya es alcanzado y no se requiere agua adicional. Si el nivel de agua en Guájaro es menor que el nivel objetivo mínimo, se evalúan dos criterios:

- El nivel de agua en El Porvenir excede el nivel de agua en Guájaro por 5 cm?
- La tendencia lineal del nivel de agua en El Porvenir ha sido positive por las últimas 5 horas?

Si ambas preguntas tienen una respuesta positive, las compuertas deberían ser abiertas, porque el nivel objetivo aún no ha sido alcanzado, hay una diferencia de fuente positiva hacia el reservorio y hay una tendencia positiva. Si no todas las preguntas tienen una respuesta positive, las compuertas permanecen cerradas, porque no hay una diferencia de fuente o no hay una tendencia de agua positive.

Si las compuertas en El Porvenir están abiertas, se evalúan dos criterios:

- La diferencia de nivel de agua entre El Porvenir y Guájaro es más pequeña que 5 cm?
- La tendencia lineal del nivel de agua en El Porvenir es negativa por las últimas 5 horas?

Si ambas preguntas tienen una respuesta positive, las compuertas deberían ser cerradas porque no hay suficiente diferencia de Fuente positive hacia el reservorio y hay una tendencia negativa. Si no todas las preguntas tienen una respuesta positive, se evalúa si el nivel de

agua en Guájaro excede el nivel objetivo mínimo con más de 15 cm. Si ese es el caso, las compuertas de El Porvenir deberían ser cerradas porque entonces se ha alcanzado el criterio de parada. Si este no es el caso, entonces las compuertas permanecen abiertas porque el criterio de parada aún no ha sido alcanzado y hay suficiente diferencia de fuente o una tendencia positiva.

De manera similar a la explicación de la operación de la compuerta de Calamar es el criterio de parada fijado en 15 cm más alto que el nivel objetivo mínimo, de modo que se evite cualquier aleteo de las compuertas de El Porvenir. En cualquier combinación de mes y tipo de clima, 15 cm de nivel adicional de agua en Guájaro conducirían a un nivel de agua que no excede el nivel máximo.

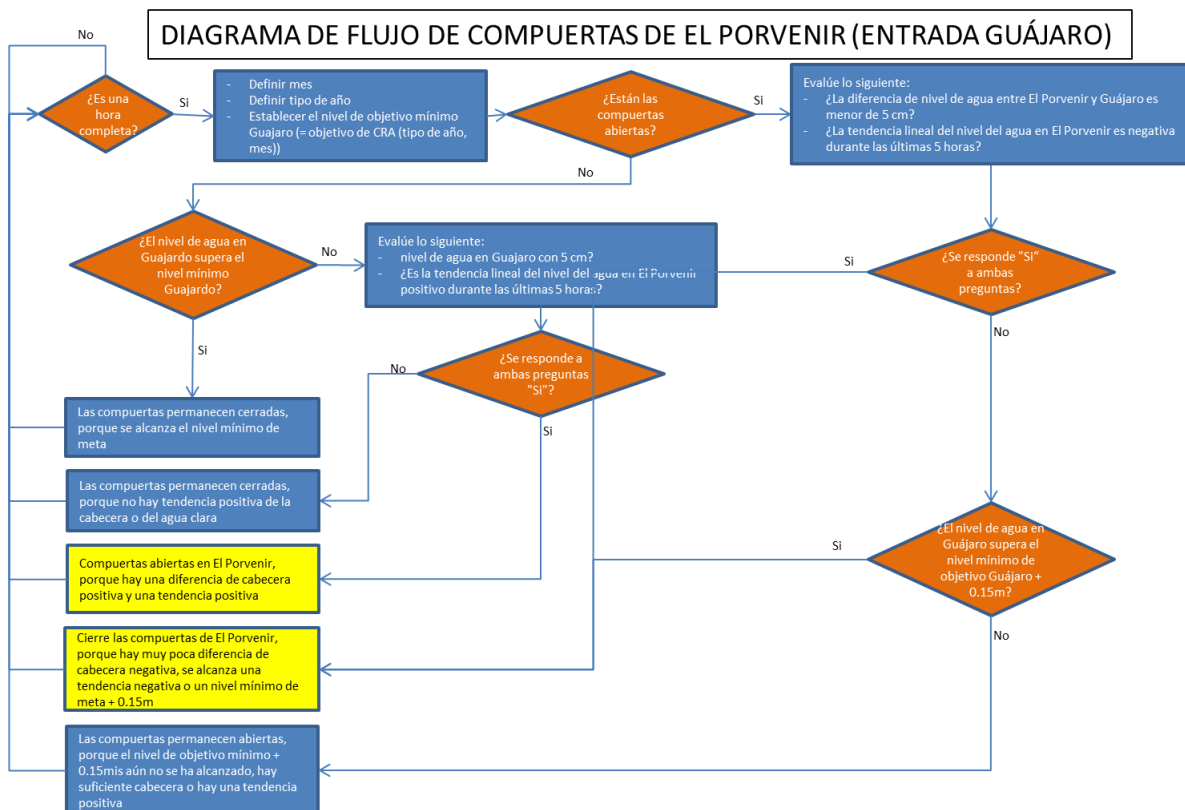


Figura 30. Diagrama de flujo de las normas de control operativo de las compuertas de El Porvenir



5.7 Control operativo de las compuertas de Villa Rosa

El párrafo 3.4 ya ha descrito brevemente las compuertas de Villa Rosa que facilitan la salida del flujo de agua del reservorio Guájaro al sistema CDD. La operación de las compuertas en Villa Rosa es tan posible en relación al protocolo actual (CRA, 2012). El esquema de control de agua que se ha creado para las compuertas de Villa Rosa (ver Figura 31) converge al nivel objetivo máximo. En general, las compuertas serán cerradas cuando el nivel en Guájaro está por debajo del objetivo máximo menos 15 cm. La salida del flujo es facilitada por las compuertas cuando el nivel de agua en Guájaro está por encima del nivel objetivo máximo y cuando hay suficiente fuente presente hacia el sistema CDD.

El esquema de control de agua es una rutina horaria que empieza a determinar el nivel objetivo máximo de Guájaro usando el mes y el tipo de clima que se aplica al día. Luego, se verifica si las compuertas están en posición abiertas o cerradas.

Si las compuertas están cerradas, se verifica si el nivel de agua en Guájaro excede el nivel objetivo máximo. Si no es el caso, entonces las compuertas permanecen cerradas porque el nivel en Guájaro está por debajo del límite superior. Si el nivel de agua en Guájaro es mayor al nivel objetivo máximo, se evalúa si el nivel de agua en Villa Rosa (lado CDD) es inferior al nivel en Guájaro. Si es así, entonces las compuertas en Villa Rosa se abren porque hay una diferencia de Fuente positive hacia el CDD y el reservorio necesita liberar agua. Si el nivel de agua en Villa Rosa (lado CDD) excede el nivel de agua en el reservorio, entonces las compuertas permanecen cerradas porque no hay diferencia de fuente positiva hacia el CDD.

Si las compuertas están abiertas, se evalúa si la diferencia del nivel de agua entre Guájaro y Villa Rosa es más pequeña que 5 cm. Si es así, entonces las compuertas se cierran porque hay muy poca o ninguna diferencia de Fuente para facilitar la salida del flujo hacia el CDD. Si la diferencia del nivel de agua es más grande, se evalúa si el nivel en Guájaro es menor que el nivel objetivo máximo de Guájaro menos 15 cm. Si es así, entonces las compuertas se cierran porque el criterio de

parada se ha alcanzado. De lo contrario, las compuertas permanecen abiertas porque el criterio de parada aún no se ha alcanzado y hay suficiente diferencia de fuente.

El criterio de parada se fija en 15 cm menos que el nivel objetivo máximo, de modo que se evite cualquier aleteo de las compuertas de Villa Rosa. En cualquier combinación de mes y tipo de clima, 5 cm menos de nivel de agua en Guájaro conduciría siempre a un nivel de agua aún mayor que el nivel mínimo.

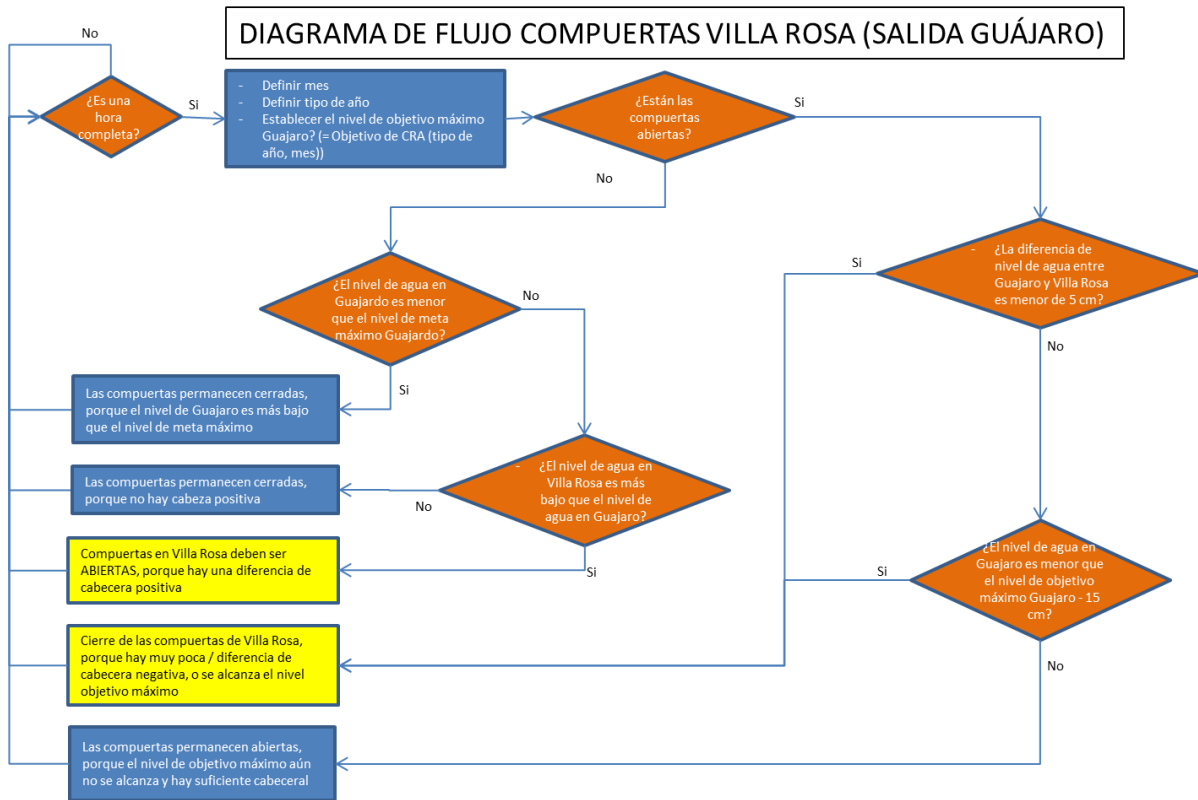


Figura 31. Diagrama de flujo de las normas de control operativo de las compuertas de Villa Rosa



5.8 Control operativo de las estructuras de entrada y salida en Dique Viejo

El numeral 3.3 ya describió brevemente las estructuras de entrada y salida en ciénaga Hobo. Este numeral describe el esquema de control de agua de las estructuras combinadas de entrada/salida de ciénaga Hobo.

Es necesario un flujo de entrada y salida controlados para proteger de las inundaciones, ya que los niveles de agua en el Río Magdalena y el Canal del Dique serán demasiado altos para los pueblos de Sato, Machado y Calamar. El control de las compuertas en la alcantarilla será manual y gestionado por el equipo en el edificio de control de Calamar. La opción para el control manual se basa principalmente en el número limitado de veces que estas compuertas serán abiertas y cerradas.

El control se centra en los siguientes aspectos:

- Fuera de los períodos pico en el CDD:
 - Lavado (entrada y salida abiertas) cuando sea posible ($RM > 5,5$ msnm y $CDD < 4,5$ msnm). Esto llevará a un nivel de equilibrio del agua en el sistema de alrededor de 5,0-5,3 msnm.
 - Bajar el nivel del agua en el sistema antes de las descargas máximas esperadas en el Canal del Dique. Estos picos tienen lugar en abril/mayo y en noviembre/diciembre. En las últimas dos semanas de marzo y octubre el nivel del agua se bajará a 5,0 msnm. En los primeros meses del año, este descenso se produce principalmente por el componente hidrológico negativo.
- Durante los períodos pico en el CDD (máximo de 50 días):
 - Ambas compuertas cerradas para evitar el aumento de los niveles de agua en el sistema. El componente hidrológico ya aportará lo suficiente.
 - Al final del período pico en el CDD (después de 40 días) y con niveles de agua aún bajos en las ciénagas (debido a un bajo componente hidrológico) se puede abrir la compuerta de entrada para elevar los niveles de agua hasta un nivel de 5,5 msnm.

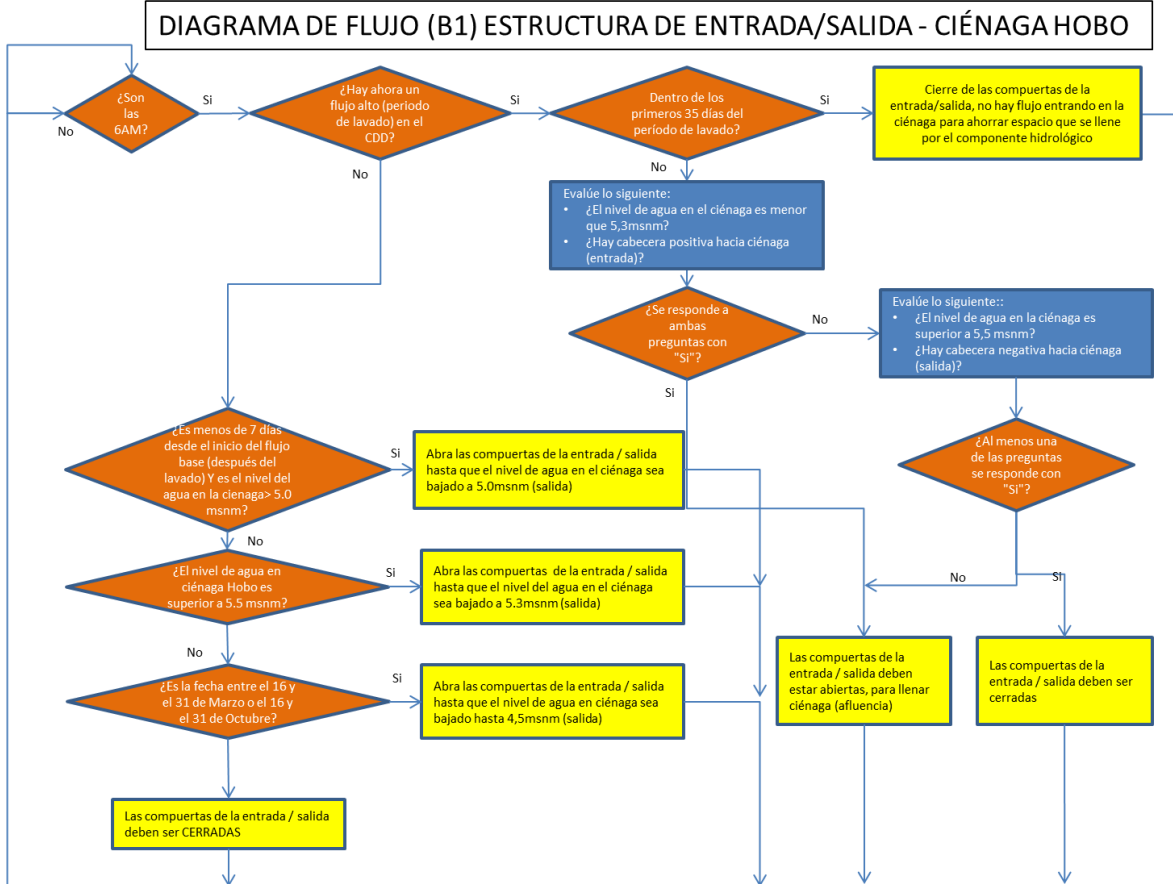


Figura 32. Diagrama de flujo de las reglas de control operativo para la estructura de entrada del complejo Dique Viejo (obra A1)

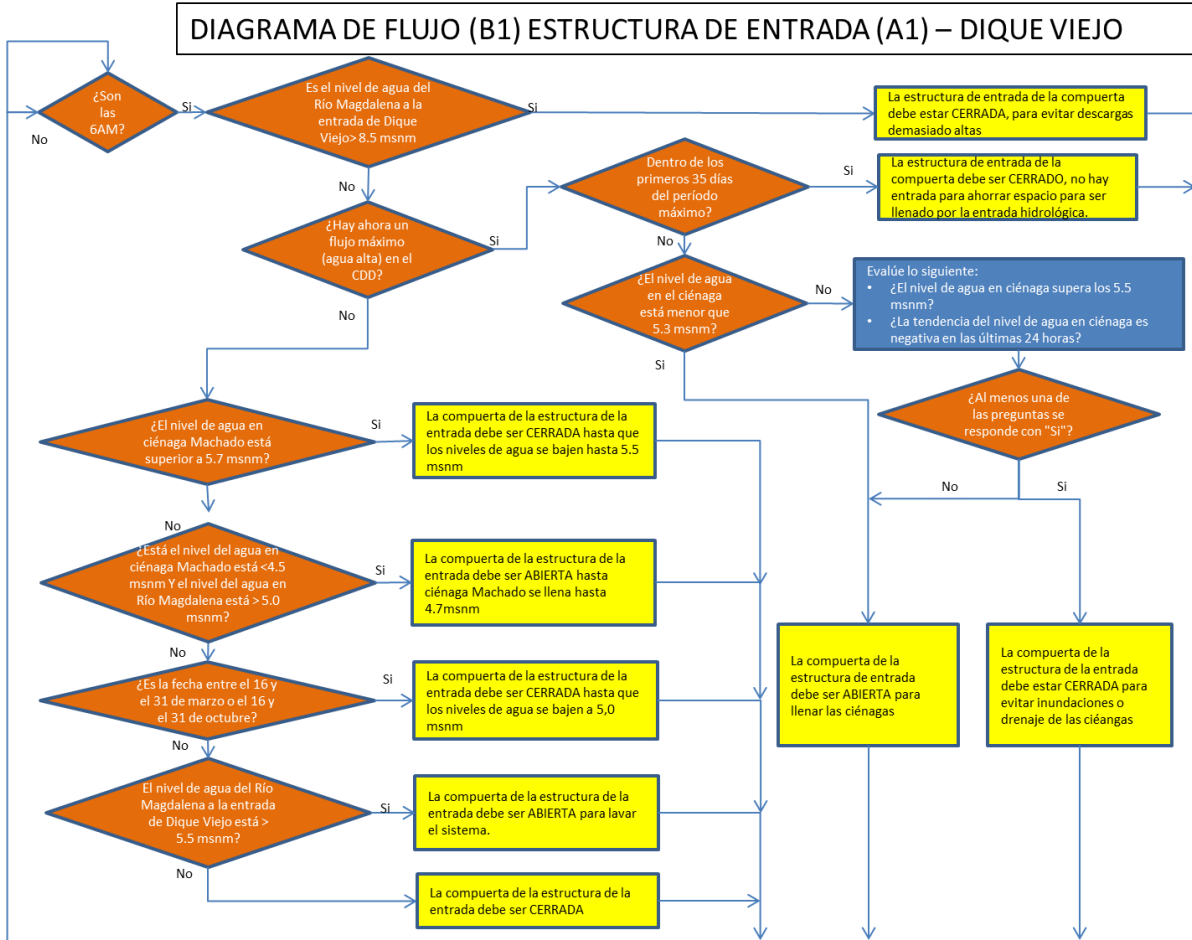


Figura 33. Diagrama de flujo de las reglas de control operativo para la estructura de salida del complejo Dique Viejo (obra A8)

5.9 Control operativo de la estructura combinada de entrada/salida en ciénaga Hobo (B1)

El numeral 3.4 ya describió brevemente las estructuras de entrada y salida de ciénaga Hobo. Este párrafo describe el esquema de control de agua de las estructuras combinadas de entrada/salida de ciénaga Hobo.



En ciénaga Hobo es necesario el flujo controlado de entrada y salida para protegerse contra las inundaciones, porque los niveles de agua en el Canal del Dique serán demasiado altos para los pueblos de Hato Viejo y Pilón. El control de las compuertas en la alcantarilla será manual y gestionado localmente por el equipo de campo operativo. La opción para el control manual se basa principalmente en el número limitado de veces que estas compuertas serán abiertas y cerradas.

El control se centra en los siguientes aspectos:

- Fuera de los períodos pico en el CDD:
 - Dejar salir el agua del sistema justo después de una descarga máxima (los periodos de migración de peces)
 - Bajar el nivel del agua en el sistema antes de las descargas máximas esperadas en el Canal del Dique. Estos picos tienen lugar en abril/mayo y en noviembre/diciembre. En las últimas dos semanas de marzo y octubre el nivel del agua bajará a 4,7 msnm. En los primeros meses del año, este descenso se produce principalmente por el componente hidrológico negativo.
- Durante los períodos pico del CDD (máximo de 50 días):
 - Al comienzo de la descarga máxima: la compuerta se cerrará para evitar el aumento de los niveles de agua en ciénaga Hobo. El componente hidrológico ya aportará lo suficiente.
 - Al final del período de pico en el CDD (después de 30 días) y con niveles de agua aún bajos en las ciénagas (debido a un bajo componente hidrológico) se abrirá la compuerta para elevar los niveles de agua hasta un nivel de 5,5 msnm.

Ciénaga Rabón tiene una entrada/salida abierta y no será controlada. El caudal máximo en el Canal del Dique y el siguiente nivel máximo de agua en el Canal mismo también limitarán los niveles de agua en este ciénaga.

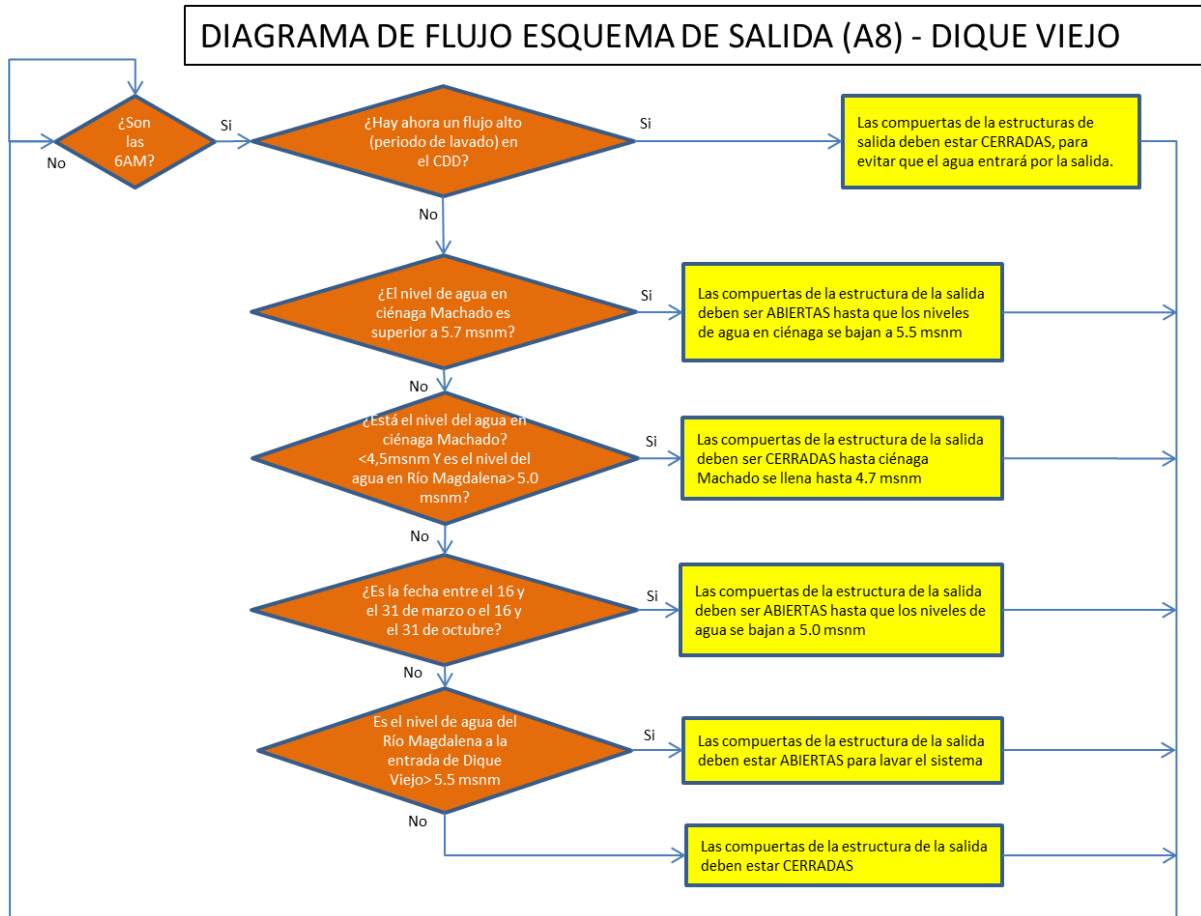


Figura 34. Diagrama de flujo de las reglas de control de operación de la estructura combinada flujo de entrada/salida en ciénaga Hobo

5.10 Control operativo de la esclusa en Puerto Badel

Aparte de la función de navegación de la esclusa en Puerto Badel, también tiene el objetivo de minimizar la influencia del agua dulce y sedimentos aguas abajo de la esclusa. Sin embargo, directamente después de la construcción se requiere un período de transición para cambiar gradualmente los entornos salobres y dulces a un entorno salino. Si el canal en Puerto Badel fuese cerrado instantáneamente después de la construcción (solo para dar paso a los barcos), el cambio



de dulce/salobre a salino sería tan abrupto que también sufrirían los manglares y otros ecosistemas tolerantes a la sal.

Para evitar esta situación, la influencia del agua salada se incrementará gradualmente. Esto se logra reduciendo la descarga de agua dulce a través de la esclusa en Puerto Badel. El input de agua dulce se reduce de tal manera que el impacto ecológico en los manglares es mínimo y muchas especies de fauna pueden mudarse a hábitats apropiados. Esto se logra monitoreando el entorno acuático y ajustando el procedimiento propuesto para la operación de las compuertas si la evaluación del monitoreo indica que es necesario. El informe "MODELACION MATEMATICA DE LA ALTERNATIVA PREFERIDA PARA DISEÑO DETALLADO" (Ref: CD.ID.123.MOD.INF.00-001) elabora en más detalle los procedimientos propuestos, sobre la evaluación y argumentación que es la base de estos procedimientos y elabora su impacto en la vida acuática (de especies actuales y nuevas).

En el período de transición, la cantidad permitida de agua dulce a través de la esclusa es una descarga que es factible y se relaciona con las descargas mínimas que han sido observadas históricamente. Cada mes, la descarga promedio a través de la esclusa se reduce con $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

El punto de inicio del período de transición debería ser comparable a las condiciones actuales del flujo. Las simulaciones con el modelo SOBEK1D2D para el año 2010 muestran que las descargas mínimas a través del Canal del Dique oscilan entre 55 y $90 \text{ m}^3/\text{s}$ en Puerto Badel durante un período de 2-3 meses. Cuando se usa la esclusa para suministrar esta cantidad de agua dulce y se cierran ambas compuertas de la esclusa, las descargas a través de las aberturas de la puerta de la esclusa oscilan entre $38 \text{ m}^3/\text{s}$ y $56 \text{ m}^3/\text{s}$. Si bien se prefiere la configuración de la esclusa de dos compuertas cerradas, en términos de seguridad y accesibilidad para la navegación, no sería suficiente al principio del período de transición porque las descargas son muy bajas. Por consiguiente, al principio del período de transición solo se debería cerrar una puerta de la esclusa (ver Figura 37). En caso de que un barco quiera pasar la esclusa, es necesario que dos puertas aún estén cerradas temporalmente (lo cual toma alrededor de 1 hora). Cuando se usa una puerta de la esclusa, la descarga a través de la esclusa varía

entre 53 y 80 m³/s (promedio de 68 m³/s). La amplitud de la marea, que está presente en el extremo aguas abajo de la esclusa de Puerto Badel, ocasiona esta variación.

Esta variación coincide bien con las descargas mínimas observadas y se prefiere al inicio del período de transición. La variación de descarga de 53 m³/s a 80 m³/s está dentro del mismo rango ya observado en Puerto Badel por períodos más prolongados. Por consiguiente, el entorno del delta ya es usado para entornos salinos o salobres lo cual hace que la transición hacia un entorno más salino sea más suave. De esta manera, la vegetación tiene tiempo para adaptarse y la fauna se puede retirar a otros entornos de agua dulce. Durante el período de transición se requiere el monitoreo ecológico para evaluar si la transición pasa suavemente y si se necesitan medidas adicionales y/o que la transición tome más tiempo. En caso se siga la reducción de 5 m³/s por mes, el período de transición tomará casi 14 meses. Si durante este tiempo el monitoreo muestra que hay efectos negativos inesperados en la vegetación o fauna, se reducirá la velocidad de transición.

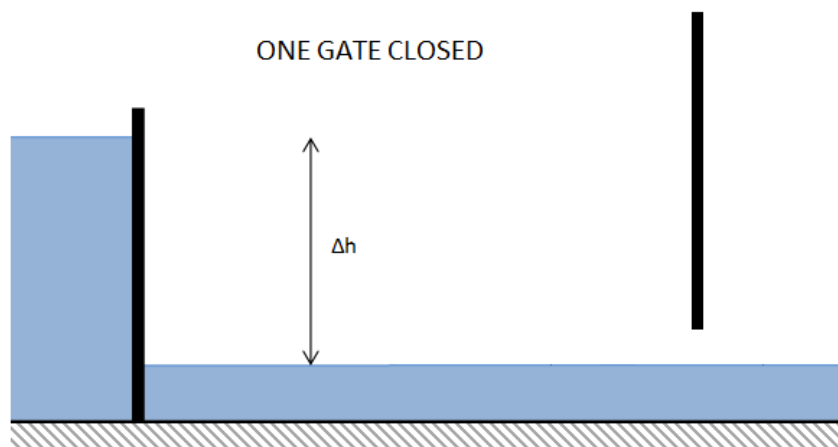


Figura 35. Configuración de la esclusa con la compuerta aguas arriba cerrada al principio del período de transición

Cuando se reduce la descarga promedio de 68 m³/s a 48 m³/s (después de un mínimo de 5 meses) se pueden cerrar ambas puertas de la esclusa (ver Figura 36). Esta configuración de esclusa permite suficiente

descarga a través de la esclusa, provee mayor seguridad y provee más flexibilidad para la navegación que quiere usar la esclusa.

TWO GATES CLOSED

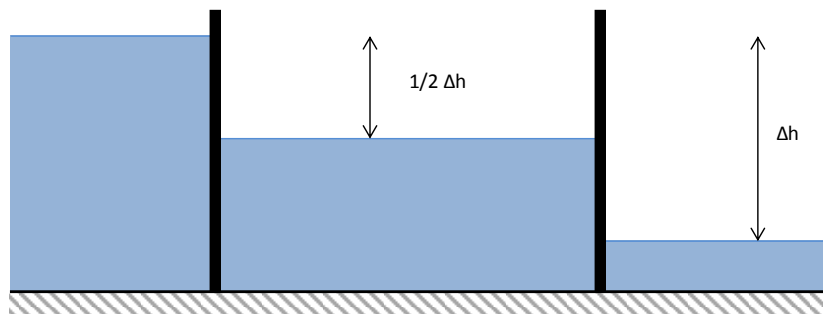


Figura 36 Configuración de la esclusa con dos compuertas cerradas

Las aperturas de las puertas de la esclusa, que se usan para permitir la entrada de agua dulce al canal corriente abajo de la esclusa, se abren localmente y es la responsabilidad del jefe de control de agua en la esclusa quien es alertado por el equipo de monitoreo ecológico.

La capacidad de esclusa de los 2 modos (Figura 35 y Figura 36) se calcula en la Tabla 5. Como el flujo (temporal) de 50m³/s evitará que el agua salina llegue muy lejos aguas arriba, la capacidad de esclusado del modo de operación con una compuerta siempre será suficiente. Con un nivel de agua de 0.4 msnm aguas abajo, la operación con dos compuertas, será posible alcanzar 50 m³/s. Se utilice la formula:

$$Q = \mu * A * \sqrt{2 * g * H}.$$

Tabla 5: Capacidad de esclusado de la esclusa Puerto Badel

Parámetro	Símbolo	2 compuertas cerradas		1 compuerta cerrada	
		Nivel alto	Nivel bajo	Nivel alto	Nivel bajo
Nivel de agua río arriba	[h _{up}]	2.60	1.60	2.60	1.60
Nivel de agua río abajo	[h _{down}]	0.35	0.35	0.35	0.35
Carga	[H]	1.13	1.25	2.25	1.25
No. Aperturas	[-]	4	4	4	4
Tamaño de apertura	[A]	1.0	1.0	1.0	1.0
Coeficiente de flujo	[μ]	0.65	0.65	0.65	0.65
Aceleración gravitacional	[g]	9.81	9.81	9.81	9.81
Flujo	[Q]	44,1	46,4	88,1	65,7
MÉTODO					
$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$					

Operación de las compuertas en las alcantarillas de los canales de riego hacia los pueblos al norte de Puerto Badel

Se pueden ajustar las compuertas en las dos alcantarillas para regular la entrada en los canales. Basándose en un flujo constante más o menos continuo a través de estos canales, es necesario ajustar las compuertas cuando cambian los niveles de agua en el Canal (aguas arriba de Puerto Badel). Bajo condiciones de flujo base, el nivel del agua estará alrededor de 1,6 msnm durante las condiciones de flujo máximo alrededor de 2,6 msnm.

El equipo operativo de Puerto Badel necesita ajustar las compuertas cuando los niveles de agua cambian, por lo tanto serán al principio y al final de cada flujo máximo. Bajo las condiciones de flujo base, las



compuertas estarán completamente abiertas, en las condiciones de flujo máximo las compuertas se abrirán a mitad de camino. Ajustes más detallados podrán basarse en el monitoreo de los niveles de agua en los canales pequeños.

5.11 Visión general del control operativo para las estructuras dentro del sistema CDD

Los párrafos anteriores describen los esquemas de control de agua para todas las estructuras de control presentes en el Sistema CDD. A continuación en la Tabla 6 se presenta una visión general simplificada de los diferentes criterios de abierto y cerrado en la que se indica el tipo de convergencia de las normas de control. Para Calamar esto es un poco diferente porque básicamente maximiza el lavado de las ciénagas y el llenado de Guájaro más arriba del nivel objetivo mínimo abriendo al nivel más bajo posible para alcanzar esto.

Las normas de control operativo explicadas en este capítulo deben ser probadas de manera más extensa en la fase de diseño detallado. Se usará el modelo SOBEK 1D para implementar estas normas y ver si funcionan apropiadamente y si es necesaria alguna optimización de las mismas.



Tabla 6. Visión general de las normas de control operativo

	Convergencia	Criterio abierto	Criterio cerrado
Compuertas de Calamar (entrada)	----	Nivel mínimo para Guájaro y ciénagas	Nivel mínimo para Guájaro y ciénagas
Compuertas de paso de peces	----	Diferencia de nivel de agua sobre las compuertas	Diferencia de nivel de agua sobre las compuertas
Compuertas de El Porvenir (entrada al embalse de Guájaro)	Nivel mínimo	Nivel mínimo objetivo	Nivel mínimo objetivo + 15 cm
Compuertas de Villa Rosa (salida embalse Guájaro)	Nivel máximo	Nivel máximo objetivo	Nivel máximo objetivo - 15 cm
Estructura de entrada Dique Viejo	Nivel mínimo	Nivel mínimo permitible	Nivel mínimo permitible + 10 cm
Estructura de salida Dique Viejo	Nivel máximo	Nivel máximo permitible	Nivel máximo permitible - 10 cm



6 Diseño detallado del Sistema de Soporte de Decisiones

6.1 Soporte de Decisiones

Se obtiene un buen control operacional cuando el Sistema SCADA (telemetría) trabaja junto con el Sistema de Soporte de Decisiones (pronósticos). Los sistemas combinados deciden la acción que se debe tomar. En el informe de diseño básico del sistema de control (Ref: CD.ID.13M.INS.INF.00-001-C: *Diseño sistema de control (requerimientos funcionales y diseño conceptual)*) se han evaluado cuatro opciones DSS diferentes usando siete criterios de diferenciación. Es evidente que la mejor solución para el sistema CDD es una configuración DSS simple, rápida y robusta sin un modelo hidráulico (ver Figura 1). Por ello, no se puede realizar ninguna simulación hidráulica del sistema CDD. Esto hace que el Sistema sea fácil de entender y operar. En cambio, el DSS necesita crear un pronóstico de nivel de agua para Calamar (en el Río Magdalena) usando un modelo estadístico. El modelo estadístico es forzado con mediciones históricas que se obtienen de la plataforma FEWS Colombia, y deberían producir un pronóstico determinístico con intervalos de confianza. Este pronóstico se envía automáticamente del DDS al Sistema SCADA en donde es ingresado para las normas y disparadores operativos que son codificados en el sistema SCADA (ver Capítulo 5). Se asume que el funcionamiento hidráulico del sistema CDD se conoce por anticipado debido al uso extensivo del modelo hidráulico 1D2D en la fase de análisis modelo del proyecto y porque el sistema CDD depende casi por completo de la configuración de la compuerta en Calamar. La operación de las estructuras de control de agua es manejada a través de las mediciones en tiempo real que ingresan en el Sistema SCADA en combinación con los niveles de agua pronosticados en Calamar.

Complejidad

Por los estudios de modelación de la fase de diseño, se conoce el comportamiento hidráulico del Sistema CDD el cual puede ser anticipado. Asimismo, el sistema del Río Magdalena es un sistema de reacción lenta y no hay ninguna compensación crucial presente cuando se toma la decisión de permitir una ola de inundación en el sistema



CDD. Significa que, en términos de control de agua, el sistema CDD es un sistema predecible, de reacción lenta. Por consiguiente, el control de agua no tiene que ser controlado por un sistema complejo de control que defiende el uso de una configuración DSS simple.

Conocimiento del operador

Dado que no hay organización conocida de operación y mantenimiento, es importante diseñar un Sistema de control que no requiera un operador con un nivel alto de conocimientos de, por ejemplo, modelos hidráulicos y algoritmos de optimización. Por ello, se defiende una configuración que sea simple de operar y que sea fácil de escalar. El sistema propuesto debería ser un sistema modular que pueda integrar fácilmente modelos hidráulicos si es oportuno en el futuro. Inicialmente, debería poder intercambiar información con el Sistema SCADA y FEWS Colombia. Por consiguiente, es fácilmente escalable en caso se requiera un avance del DSS en el futuro.

Desde una perspectiva técnica, la implementación del DSS puede tener dos etapas: Etapa 1, es la preparación de un sistema autónomo para usuarios simples y operación manual. Esta opción tiene umbrales técnicos bajos y deberían ejecutarse en una PC estándar que esté conectada a internet y al Sistema SCADA. Si se requiere la automatización del Sistema y la operación (remota) de usuarios múltiples, una etapa 2 del sistema consistiría en una arquitectura de servidor y múltiples clientes basados en la web. La solución propuesta del software debería ser escalable para brindar todas las características de soporte de decisiones en ambos tipos de sistema.

6.2 Pronóstico

El DSS necesita tener un pronóstico de nivel de agua para decidir en qué momento se deberían abrir las compuertas de Calamar y en qué medida. De preferencia, se provee un pronóstico externo por la plataforma FEWS Colombia que sea importada y procesada por el DSS. Como una segunda opción, debería estar disponibles un modelo de regresión interna, como parte del DSS, para pronosticar el nivel de agua en Calamar independientemente sobre un determinado horizonte de



predicción usando medidores del nivel de agua corriente arriba a lo largo del Río Magdalena.

6.2.1 FEWS Colombia

Al momento de la redacción, no hay pronóstico del nivel de agua disponible para Calamar (ver <http://fews.ideam.gov.co/>). La plataforma FEWS Colombia solo tiene mediciones en tiempo real del Río Magdalena. La plataforma incluye algunos modelos hidrológicos e hidráulicos para tres regiones más aguas arriba de la captura que no se pueden usar para efectos de predicción del nivel de agua en Calamar. El avance de FEWS Colombia podría hacer un pronóstico del nivel de agua para Calamar disponibles en algunos años (ver casillero verde para un panorama futuro). En caso haya un pronóstico externo disponible en el futuro (cercano) el DSS debería poder importarlo y usarlo como corresponde.



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



Desarrollo de los modelos

Varios desarrollos de modelos están en curso al momento de esta redacción. No se sabe cómo avanzarán estos desarrollos en el futuro cercano y cuál es la capacidad que se usará como una herramienta de predicción para los niveles de agua en Calamar. IDEAM tiene una ambición de largo plazo para implementar estos modelos en el entorno FEWS Colombia, pero no tiene una planificación clara de cuándo se terminarán estas implementaciones. La agencia Cormagdalena está desarrollando un modelo hidrológico-hidráulico acoplado que es capaz de simular los niveles de agua en El Banco. IDEAM también está desarrollando un modelo hidráulico que va hasta El Banco. Un tercer desarrollo de modelo es un esfuerzo combinado de IDEAM, Fondo Adaptación y Deltares quienes intentan crear un modelo hidráulico 1D2D hasta Magangué. Finalmente, hay un modelo hidrológico que se está desarrollando en IDEAM de toda la captura del Río Magdalena (Comunicación personal con Oscar Martínez, jefe del Grupo de Modelación y Pronóstico Hidrológico, IDEAM). En caso que los desarrollos modelo futuros creen la oportunidad de usar modelos hidráulicos y/o hidrológicos para el pronóstico del Río Magdalena, puede ser posible extender la configuración DSS actual e importar este pronóstico o producir este pronóstico por el entorno DSS.

Pronóstico de precipitación

El DSS tiene la posibilidad de importar, visualizar y procesar las Predicciones Numéricas del Tiempo (NWP) que se usan actualmente en FEWS-Colombia: pronósticos MM5, GFS y WRF. La información sobre la precipitación pronosticada sería una característica adicional del DSS, pero no es vital para el funcionamiento del sistema. Brindaría información sobre la precipitación que se anticipa en el sistema CDD. Esto puede proveer al operador algún conocimiento del llenado del reservorio Guájaro y de las ciénagas.



6.2.2 Modelos de regresión multi lineal

Considerando que los desarrollos futuros descritos son inciertos, se prevé que no hay pronóstico externo alguno del nivel disponible de agua para ser usado en el Sistema de control operacional. Por consiguiente, el DSS debería ser diseñado para incluir al menos un modelo interno de predicción para obtener conocimiento del comportamiento futuro del Río Magdalena. Se han desarrollado algunos modelos de regresión multi lineal (MLR) para pronosticar niveles de agua de hasta 10 días (ver apéndice 2). Estos modelos estadísticos, black-box, usan mediciones históricas del nivel de agua de lugares aguas arriba para pronosticar el nivel de agua en Calamar en la entrada del Canal del Dique.

Modelos de regresión lineal múltiple

La opción propuesta para el pronóstico es un juego de modelos de regresión lineal múltiple que usa relaciones estadísticas con 10 lugares aguas arriba del sistema del Canal del Dique (incluyendo Calamar en sí) como input para crear pronósticos determinísticos (ver Figura 37).



Figura 37. Estaciones usadas de nivel de agua para los modelos de regresión lineal múltiple

De cada estación, se usan en total 6 diferentes desfases de tiempo como input para el modelo de regresión; el nivel de agua en T_0 y 1 a 5 días atrás en el tiempo (ver área azul en la Figura 38).

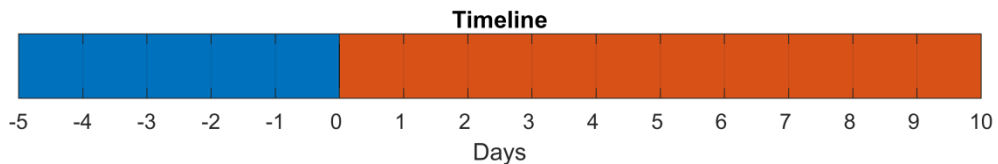


Figura 38. Línea temporal de modelos de regresión, el área azul se usa como input para el modelo de regresión; el rojo son diferentes variables de salida para modelos consecutivos.



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



Se usa un método de regresión escalonado para definir todos los modelos MLR. Se usa un período de 20 años (1990 – 2010) para la calibración y se usa un período diferente de 10 años para la validación (1980 – 1990).

Tabla 7. Resultados de calibración y validación para los 10 modelos de predicción

Modelo	T + 1	T + 2	T + 3	T + 4	T + 5	T + 6	T + 7	T + 8	T + 9	T + 10
Número de pronosticadores	24	26	28	31	28	27	27	25	25	23
Modelo R ²	0.9998	0.9995	0.9988	0.9975	0.9955	0.9926	0.9890	0.9847	0.9799	0.9745
Modelo RMSE (cm)	2.0	3.5	5.3	7.6	10.3	13.1	16.0	18.9	21.8	24.5
Validación R ²	0.9998	0.9994	0.9986	0.9974	0.9955	0.9927	0.9895	0.9851	0.9791	0.9726
Validación RMSE (cm)	1.8	3.3	5.0	6.7	9.2	11.7	14.0	16.8	19.8	22.6

Desempeño e incertidumbre

El error de los niveles de agua pronosticados (Root Mean Squared Error (RMSE)) se considera pequeño y es aún más pequeño para el período de validación (más pequeño que 10 cm para pronósticos de nivel de agua de hasta 5 días). Esto significa que el poder de predicción de los modelos es razonablemente bueno. Lógicamente, estos errores se incrementan con el horizonte temporal de predicción en aumento (ver Tabla 7).

Los Términos de Referencia prescriben que para la operación diaria del Sistema, la política de operación debería adoptar la simulación que tiene un nivel de probabilidad de 95%. El modelo estadístico propuesto solo produce un resultado, de modo que el input de incertidumbre no puede ser cuantificado de esta manera. Sin embargo, la regresión cuantílica se aplica a los residuos para identificar los vínculos del intervalo de confianza para cada modelo usando la incertidumbre modelo. De esta manera se puede presentar el nivel de probabilidad de un nivel de agua pronosticado (ver Figura 39). La Figura 39 es un ejemplo de predicción que es un compuesto de resultados de los 10 modelos (ver círculos) incluyendo los intervalos de confianza de 50%, 80% y 90% en gris

encontrados por la regresión cuantílica. Es evidente que, en general, los pronósticos proveen unan predicción (muy) buena para los primeros 5 días de los horizontes temporales de predicción.

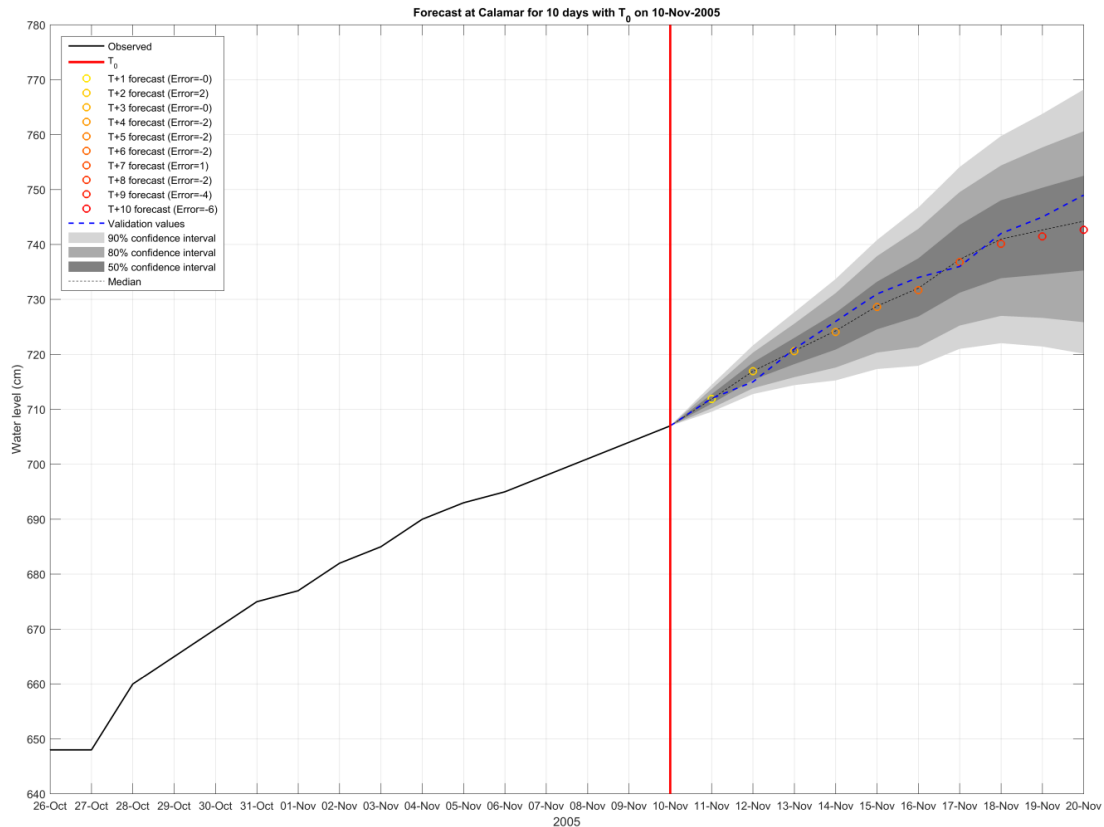


Figura 39. Ejemplo de niveles de agua pronosticados para 10 días usando la regresión lineal múltiple y regresión cuantílica

Aplicación

Estos modelos MLR se pueden usar como una herramienta operacional para pronosticar los niveles de agua en el Río Magdalena y tomar decisiones sobre la operación de las compuertas en Calamar (ver párrafo 5.4). Para una implementación práctica de estos modelos, se han considerado varios aspectos importantes:



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



- Los niveles observados de agua que son input para los modelos MLR no deberían contener valores atípicos, dado que ellos incluyen directamente en la calidad del pronóstico. Por consiguiente, se requiere un procesamiento previo para retirar niveles de agua no realistas.
- El jefe de control de agua siempre necesita interpretar los resultados de predicción por sí mismo para ver si se han producido pronósticos no realistas que, por ejemplo, no se puedan explicar físicamente. Sería bueno comparar un nuevo pronóstico para observar si hay cambios abruptos que no pueden ser explicados.
- Los modelos MLR son válidos solo si no se hacen cambios considerables al sistema de agua que afecten los niveles de agua de las estaciones de monitoreo utilizadas. Si se hacen cambios significativos a la captura, los modelos MLR deberán ser recalibrados para tener en cuenta estos cambios;
- Los modelos MLR usan lecturas del nivel de agua sin conversión a un nivel referencial. Por consiguiente, el nivel pronosticado de agua en Calamar necesita ser convertido a un nivel referencial m.s.n.m. al sustraer 36 cm.
- Se usan los niveles de agua observados en el Río Magdalena en Calamar (K93) como input para los modelos MLR, pero incluirán los efectos de remanso mientras que se construyen los modelos MLR usando niveles de agua que no están afectados por el proyecto CDD. Nuevamente, se necesita una corrección para obtener niveles de agua que los modelos MLR puedan usar;
- De manera similar, el impacto del nivel de agua en el Proyecto del Canal del Dique no se ha tomado en cuenta en los niveles de agua pronosticados. Así, estos niveles de agua no incluyen el efecto de remanso que surge debido al flujo restringido en el sistema CDD y la presencia de estructuras de esclusas y compuerta. Se necesita una corrección para obtener niveles realistas;

6.2.3 Correcciones

Corrección del input para los modelos MLR

Como se ha mencionado, los niveles de agua observados (después de implementar el Proyecto CDD) en el Río Magdalena en Calamar incluyen un efecto de remanso que es ocasionado por la afluencia controlada. La



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



cantidad de efecto de remanso es una función del nivel de agua en el Río Magdalena y la afluencia en el sistema CDD. La Figura 40 muestra el efecto de remanso negativo que se necesita agregar del nivel de agua observado para obtener el nivel que estaría presente sin el proyecto CDD. Demuestra que el impacto en los niveles de agua del Río Magdalena es mayor cuando la afluencia en el Canal se reduce más. También, el impacto debido a la afluencia reducida es más alto en niveles de agua de alrededor de 7-8 msnm en Calamar. En niveles más altos de agua el proceso de desborde conduce a un impacto menor en los niveles de agua.

El nivel sin el Proyecto CDD puede ser información para los modelos MLR y se pueden calcular por:

$$H_{RM\ K93,observed,MLR-model} = H_{RM\ K93,observed} + correction(no\ CDD\ project).$$

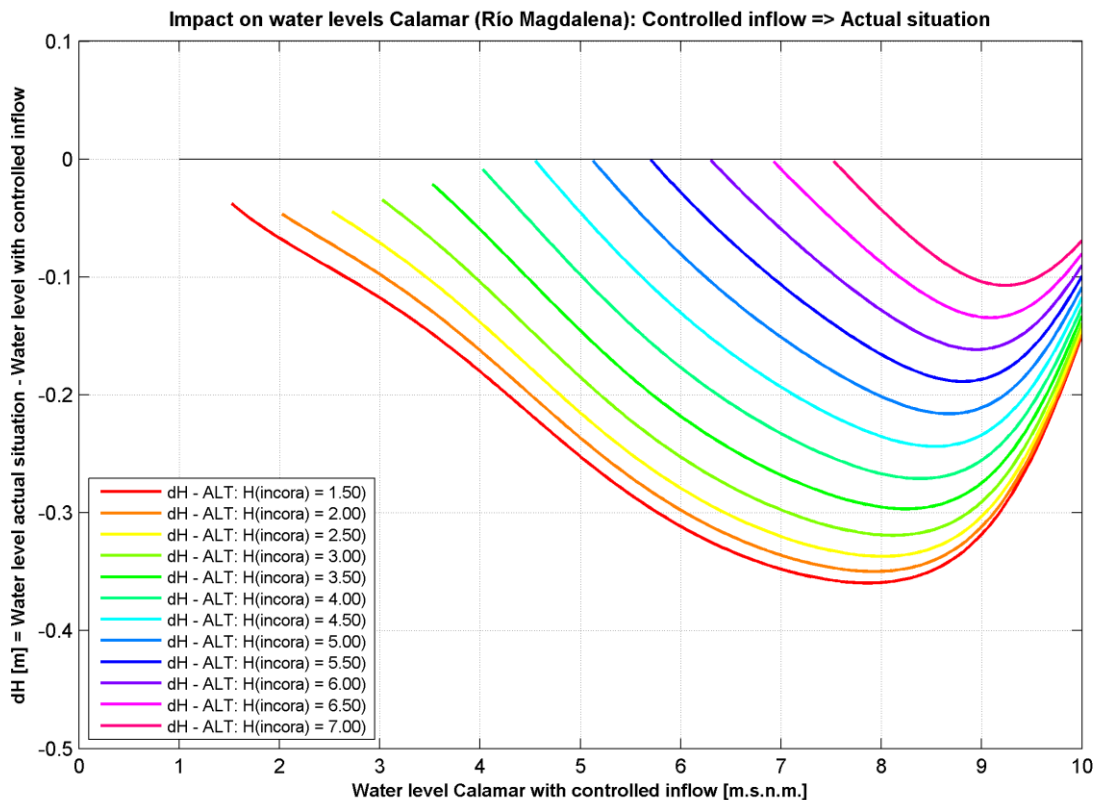




Figura 40. Efecto de remanso en el Río Magdalena de los niveles del pre-proyecto en relación a la afluencia controlada

Corrección del resultado del modelo MLR para la comparación con el nivel de umbral

Los niveles pronosticados de agua también deben ser corregidos para incluir el efecto de remanso de las estructuras de Calamar cuando todas las compuertas estén abiertas porque esta situación necesita ser evaluada para ver si el nivel de umbral (explicado en el párrafo 5.3.2) es excedido. La corrección varía entre 1.5 cm y 5 cm y es una función del nivel de agua en el Río Magdalena (ver Figura 41). Por ello, el nivel de agua corregido, pronosticado se calcula con:

$$H_{RM\ K93,forecast} = H_{RM\ K93,MLR-model} + correction(open\ gate).$$

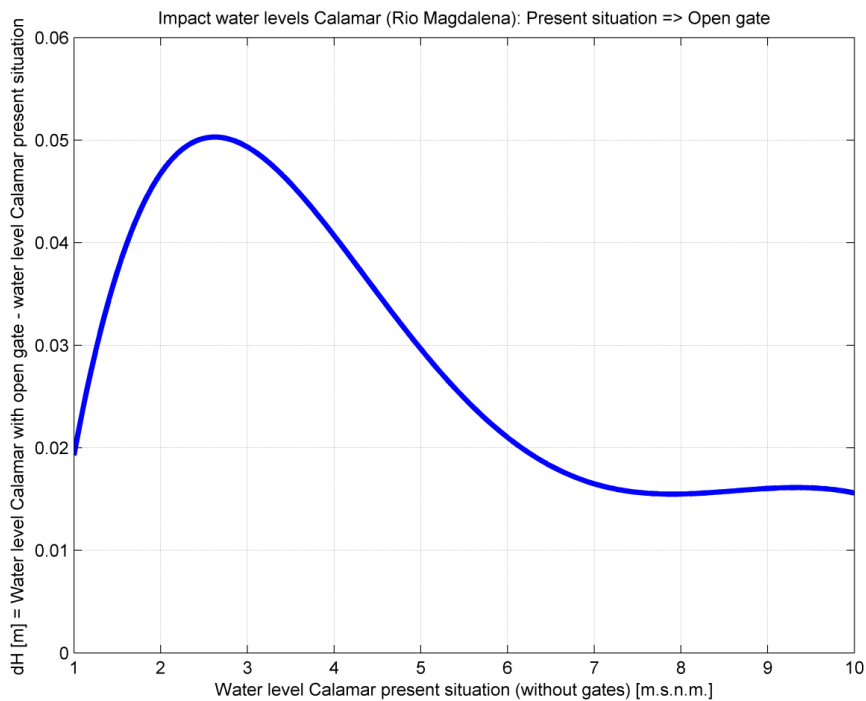


Figura 41. Efecto de remando en el Río Magdalena de la configuración de compuerta abierta en relación a los niveles de agua del pre-proyecto.

Corrección del resultado del modelo MLR a niveles realistas de agua
 Los niveles pronosticados de agua también deben ser corregidos a niveles realistas cuando se calcula una tendencia lineal entre niveles de agua T-2 a T+2. Esta tendencia lineal es necesaria en la verificación de inicio (ver párrafo 5.4.2) y en la verificación provisional (ver párrafo 5.4.4). Por consiguiente, los niveles de agua pronosticados deben ser corregidos de tal manera que incluyan el efecto de remanso de las estructuras de Calamar que dependen del nivel de agua en el Río Magdalena y la afluencia controlada en el sistema CDD.

$$H_{RM\ K93,forecast} = H_{RM\ K93,MLR-model} + correction(realistic\ level).$$

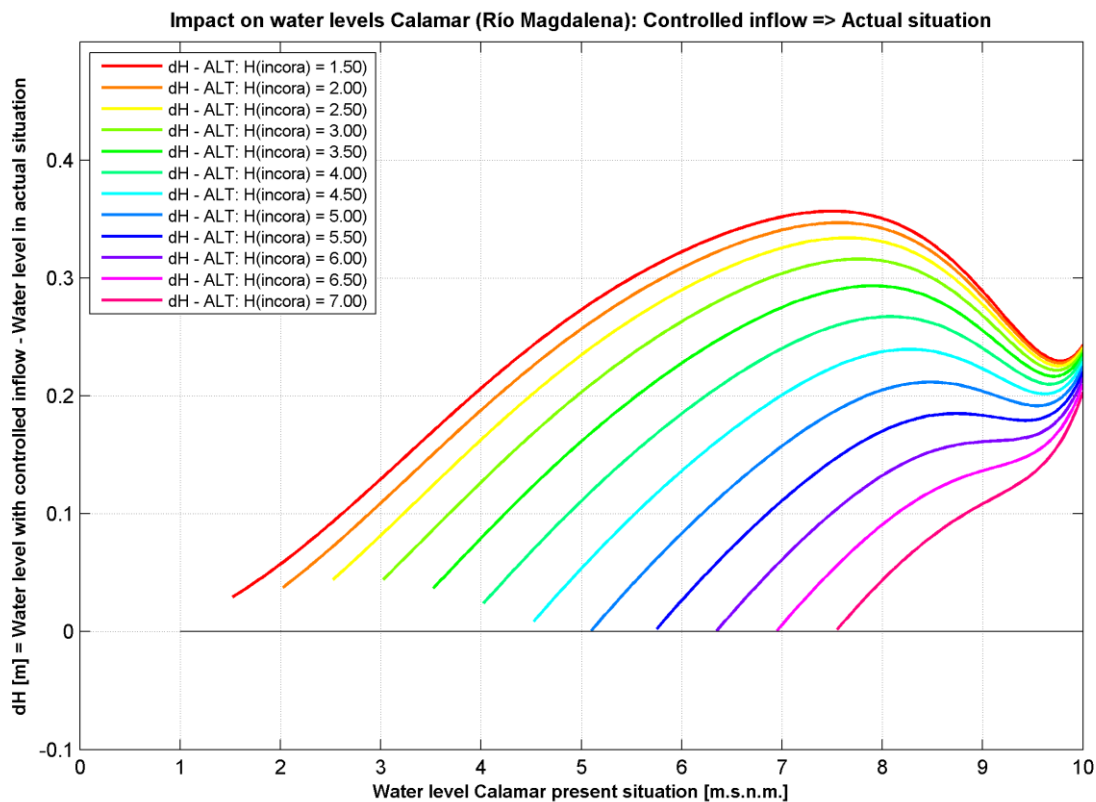


Figura 42. Efecto de remanso en el Río Magdalena de la afluencia controlada en relación a los niveles de agua del pre-proyecto



6.3 Arquitectura del sistema

6.3.1 Especificaciones funcionales

El DSS tiene una arquitectura de Sistema modular para desacoplar la base de datos e interfaces de usuario de los modelos integrados. Los modelos serán acoplados a través de un adaptador genérico que permite la integración de modelos adicionales y/o el intercambio de modelos existentes mediante la configuración.

El DSS se puede usar en modo offline y online. El modo offline se usa para el desarrollo del Sistema, capacitación y efectos de análisis en combinación con datos históricos sin conexión al sistema de producción. El sistema online sirve como Sistema de producción para la operación diaria del sistema del canal. Ambos modelos comparten una configuración idéntica con características funcionales de soporte de decisión idénticas, es decir, la misma alimentación de datos, modelos y opciones de visualización.

Una característica básica del DSS es el procesamiento de un producto de predicción determinístico con un horizonte de predicción de hasta 10 días. Este producto de predicción determinístico puede ser de una Fuente externa o ser producido en el DSS por el modelo estadístico disponible (ver párrafo 6.2.2).

Este DSS funcionará por separado del Sistema SCADA. Importa datos SCADA, importa mediciones y pronósticos meteorológicos (precipitación) e hidrológicos (nivel de agua, caudales), procesa los datos y genera sus propios productos de predicción en base al modelo integrado después de lo cual exporta los datos de nuevo al sistema SCADA. Todos estos flujos de trabajo se programan diariamente y tienen lugar automáticamente.

6.3.2 Especificaciones técnicas

La versión offline del DSS se ejecuta en una PC Windows estándar. Debería habilitar el uso autónomo de hasta 10 usuarios incluyendo licencias para todos los componentes integrados.



La versión online del DSS se integra al entorno redundante del servidor de la sala de control del CDD. Se ejecuta como un Sistema de producción para hasta 10 usuarios paralelos. El acceso al sistema se hace mediante la interfaz de la web o el software del cliente. Como opción, permite el acceso seguro desde otras organizaciones para proveer soporte y servicios de mantenimiento o para contribuir a la toma de decisiones.

Se espera que el DSS tenga las siguientes interfaces y/o capacidades:

- Interfaz al sistema SCADA del CDD para recibir datos de telemetría a lo largo del canal y configuraciones de compuerta (formato SCADA). Esto incluye por lo menos:
 - Niveles de agua observados aguas abajo y arriba de las compuertas Calamar
 - Configuración de compuertas de Calamar
 - Nivel de agua observada en El Porvenir
 - Nivel de agua observada en reservorio Guájaro
- Importación de filtro para Predicciones Numéricas del Tiempo (formatos grib1 y grib2)
- Importación de filtro para las mediciones históricas y en tiempo real y pronósticos de la plataforma FEWS-Colombia (usando Delft-FEWS PI-XML). Esto incluye, sin sentido limitativo, mediciones del nivel de agua de los últimos 6 días (T0 a T-5) en:
 - Calamar
 - Plato
 - Magangue-Esperanza
 - San Roque
 - El Banco
 - Las Varas
 - La Coquera
 - Barrancabermeja
 - Puerto Berrio
 - Puerto Salgar
- Módulos de validación para validar las series temporales importadas de FEWS-Colombia y SCADA y retirar datos no confiables (si esto no se ha realizado aún).
- Módulos de transformación:



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



- Para interpolar o extrapolar series temporales para llenar los vacíos
- Para calcular los niveles pronosticados de agua para 10 horizontes de predicción usando ecuaciones conocidas de regresión lineal múltiple.
- Para hacer correcciones a las series temporales (ver párrafo 6.2.3):
 - Cambiar el nivel de agua observado en Calamar de modo que se pueda aplicar como input para los modelos MLR
 - Cambiar el nivel de agua pronosticado en Calamar (resultado de los modelos MLR) al nivel de referencia de m.s.n.m.
 - Cambiar el nivel de agua pronosticado (referenciado) en Calamar (resultado referenciado de los modelos MLR) para que se puedan usar para comparar los niveles de umbral.
 - Cambiar el nivel de agua pronosticado (referenciado) en Calamar (resultado referenciado de los modelos MLR) para que represente un nivel de agua realista
- Para combinar series temporales
- Filtro que muestra el pronóstico compuesto incluyendo intervalos de confianza de 90%, 80% y 50% usando la regresión cuantílica (ver Figura 39).
- Display del umbral:
 - Umbral Guájaro (dinámico, dado que varía en base al nivel Guájaro)
 - Umbral Ciénagas (+6.86 msnm en RM K93)
 - Umbral de alivio de inundación (+8.57 msnm en RM K93)
- Módulo de reporte para preparar reportes en formatos HTML o PDF incluyendo, sin sentido limitativo, información sobre:
 - Estado del sistema (baseflow/open-to-flush/interim/close-to-baseflow)
 - Nivel de agua en RM K93 incluyendo tres umbrales
 - Pronóstico de 10 días en RM K93 incluyendo intervalos de confianza de 90%, 80% y 50%.
 - Tabla con probabilidad de que el valor de predicción T+5 del nivel de agua exceda cualquiera de los tres umbrales;

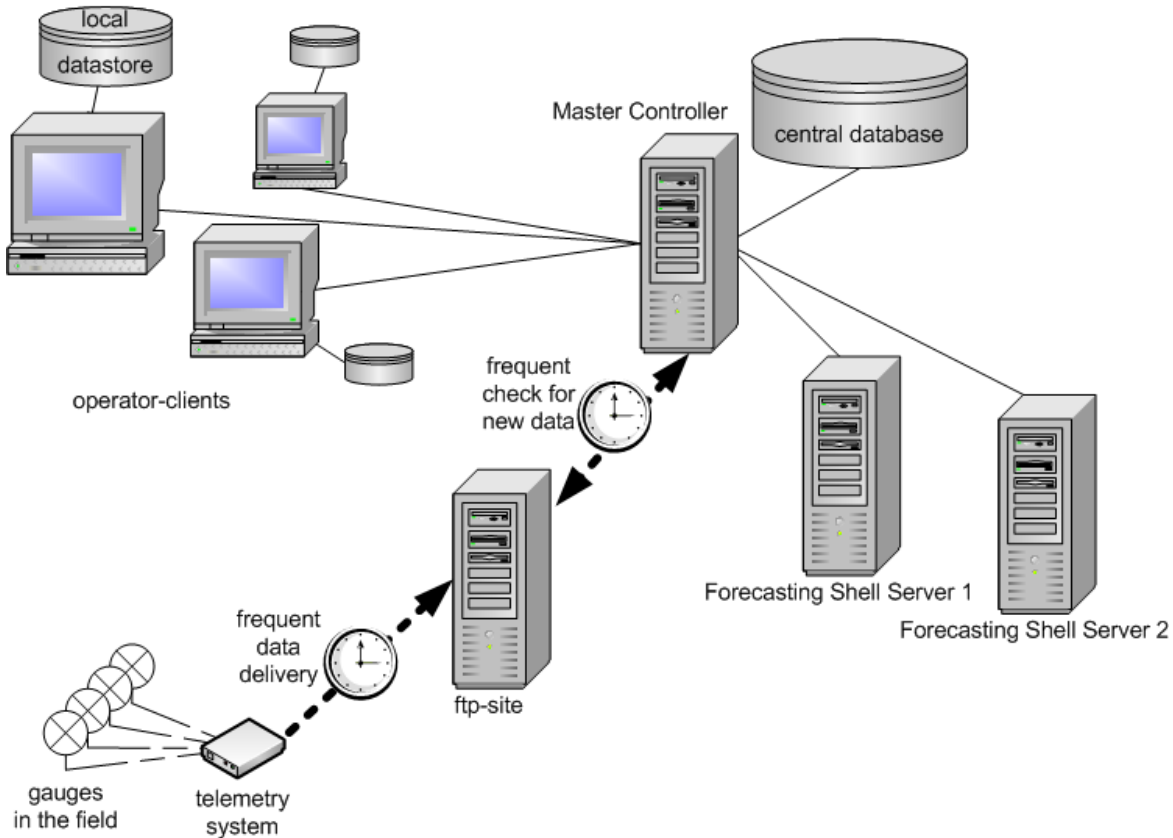


- Descarga en compuertas de Calamar basada en niveles de agua y la relación entre descargas y niveles (Q-H)
- Nivel de agua corriente arriba de las compuertas de Calamar
- Configuración de las compuertas de Calamar (por ejemplo, mediante una demostración esquemática)
- Nivel de agua aguas debajo de las compuertas Calamar
- Nivel de agua en El Porvenir
- Nivel de agua en Guájaro incluyendo el nivel objetivo máximo y mínimo en base al tipo de año real (El Niño, La Niña o neutral)

6.3.3 Especificaciones del hardware

Las especificaciones del hardware pueden diferir para el software específico que se usa. En este párrafo las especificaciones se basan en un DSS que es construido usando Delft-FEWS, dado que se conecta fácilmente a FEWS Colombia. Se muestra una configuración típica FEWS en la Figura 43. Sírvase observar que estas especificaciones pueden desviarse si se usan diferentes entornos DSS.

Figura 43. Esquema de un sistema típico de advertencia temprana de inundación



Servidor del Controlador Maestro:

Función: El controlador maestro organiza el tráfico de las tareas y la programación

- Mínimo 1 GB RAM por Controlador Maestro
- CPU típico Intel Xeon 2.33 GHz o equivalente.
- Sistema operativo: Windows 7 / 8 / 10, Servidor 2008 / 2012(R2), Linux RedHat / CentOS / SUSE, Otros posibles sistemas operativos como Unix (por ejemplo HP-UX, Solaris), siempre que haya un Java JRE con la versión correcta disponible para el OS.
- Se requiere un proveedor JMS como JBoss 4 / 5 o ActiveMQ pero se permite que esté en otro servidor. Dado que el servidor MQ



puede necesitar bastante cpu / io, se recomiendo que ningún otro proceso io pesado tenga lugar en la misma máquina.

- Cantidad necesaria: 1

Cientes Operadores:

Función: El Cliente Operador (Gui) es el cliente pesado para los usuarios finales.

- PC normal
- Mínimo 512 MB RAM, 1GB recomendado
- Sistema operativo: Windows 7 / 8 / 10, Servidor 2008 / 2012(R2), Linux RedHat / CentOS / SUSE
- Cantidad necesaria: tantos como clientes haya
- Usable en Citrix
- Los usuarios ejecutan su propia credencial de conexión, no se requieren privilegios administrativos

Base de datos central

Función: Este es el repositorio de datos central, vinculado al controlador maestro. El Sistema vivo se ejecuta con las siguientes versiones de base de datos:

- Oracle 9 / 10 / 11 / 12
- PostgreSQL 9.3 / 9.4, si se usa Postgres 9.2 o anterior, sírvase migrar por lo menos a 9.3 dado que en esas versiones la transferencia binaria no está implementada de manera aceptable (esto se requiere tanto para DDA como para clientes sincronizadores).
- MS SQL Server 2008 / 2008R2 / 2012 / 2014.

Servidor de Consola de Predicción

El Servidor de Consola del Servidor es el servidor para ejecutar las corridas de predicción, y contiene el software de modelación y su operación es controlada por el Controlador Maestro

- Mínimo 2 GB RAM
- Un núcleo de CPU por instancia FSS,
- CPU típico Intel Xeon 2.33 GHz o equivalente.



- Sistema operativo: Windows 7 / 8 / 10, Servidor 2008 / 2012(R2), Linux RedHat / CentOS / SUSE contiene software de modelación (incl. licencias), OS usualmente dependiente de módulos de terceros y software de modelación
- Cantidad necesaria: mínimo 2, más dependen de la carga computacional
- Se pueden usar las consolas de predicción de Windows y linux simultáneamente

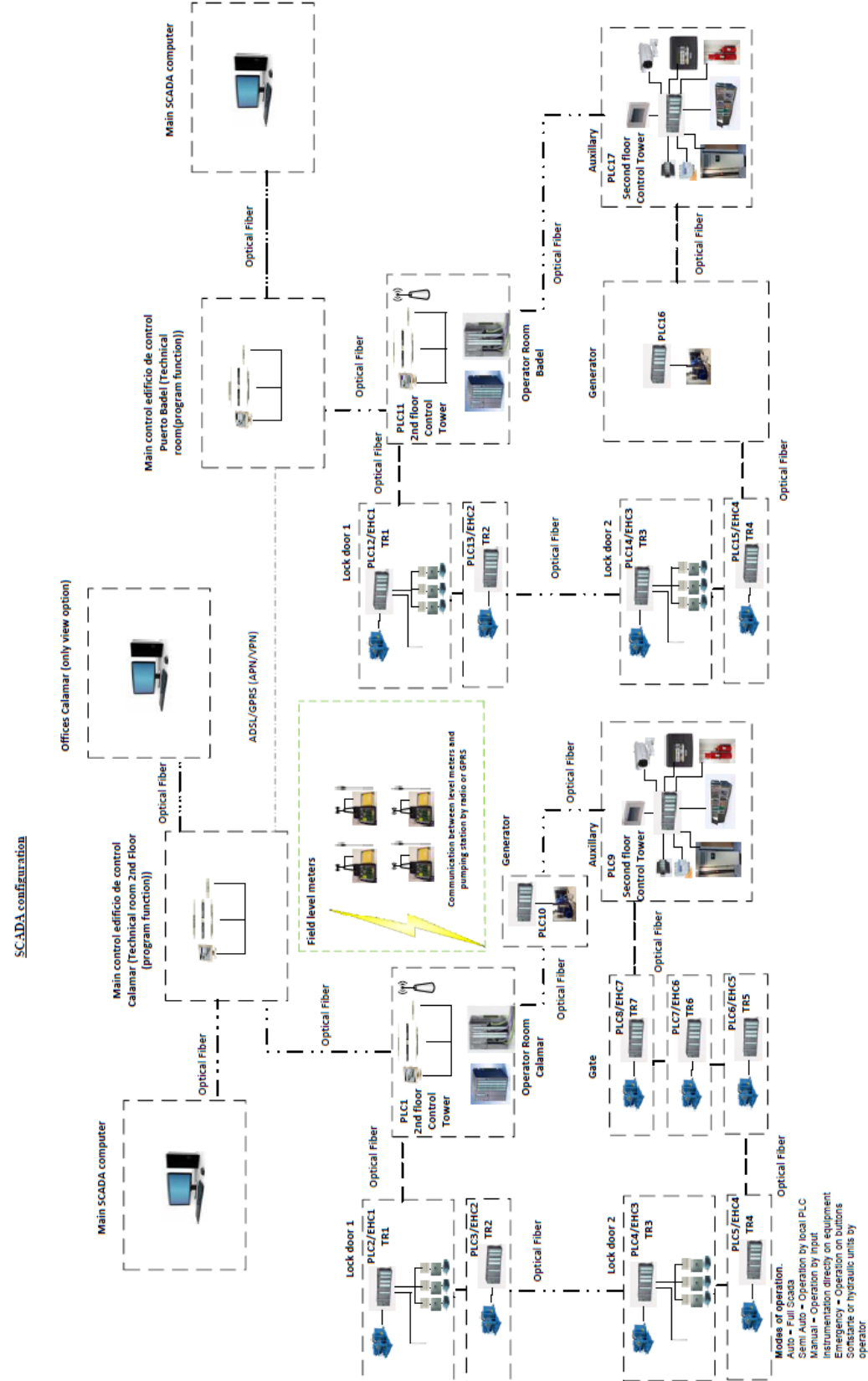
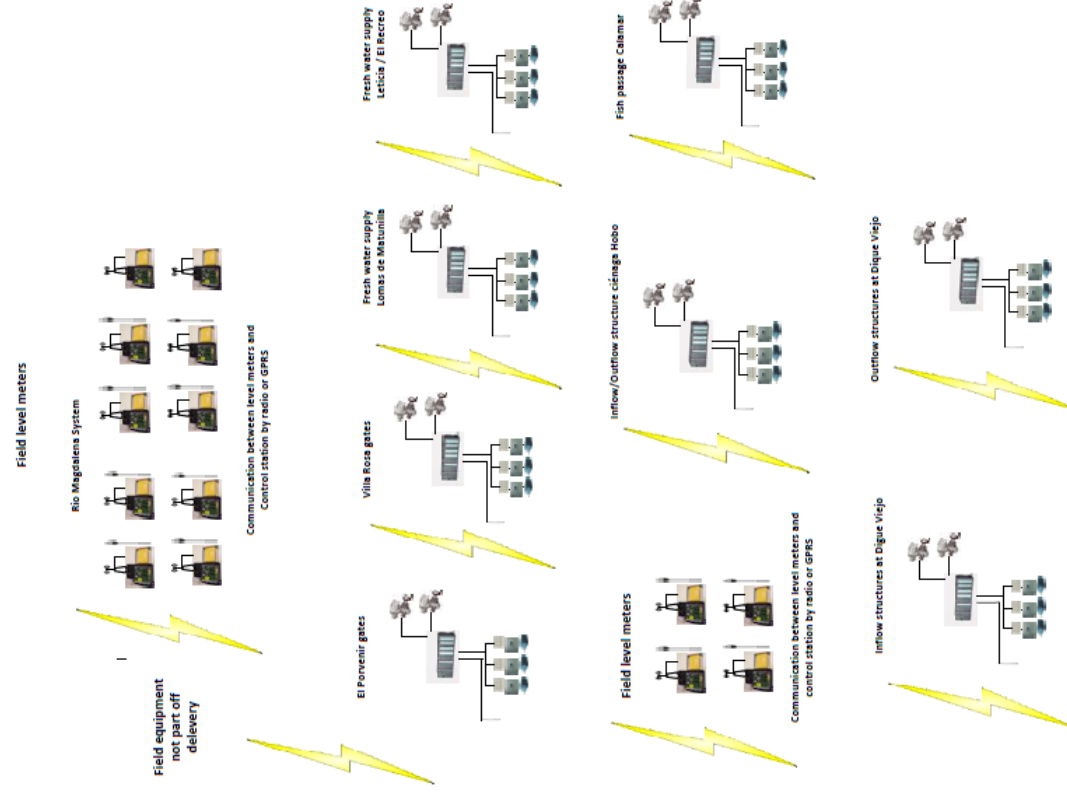


7 Referencias

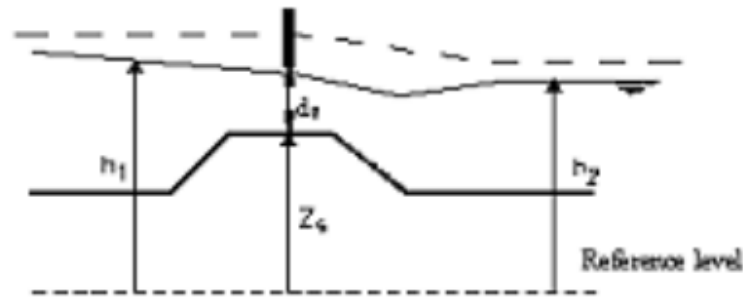
- Consorcio Dique (2015a). Estudios Básicos: análisis de los volúmenes de sedimentos que ingresan al Canal del Dique, a las ciénagas y a las Bahías de Cartagena y Barbacoas, March 2015 (CD.ID.113.HIDR.INF.00-006)
- Consorcio Dique (2015b). Anexo 1 - el desarrollo, la evaluación y la selección de las alternativas, May 2015 (CD-IB-120-MOD-INF-00-002-C Anexo 1)
- Consorcio Dique (2016a). Diseño sistema de control (requerimientos funcionales y diseño conceptual), Abril 2016 (CD.ID.330.HID.INF.00.001)
- Consorcio Dique (2016b). Technical note Final Design: Electrical and SCADA Lock and weir Calamar and lock Puerto Badel, Abril 2016 (CD.ID.13H.ELE.INF.00-001-B)



Apéndice 1: Visión general de los PLC en la configuración SCADA del sistema operativo del Canal del Dique



Apéndice 2: Ajuste de configuraciones de la compuerta



La compuerta se puede mover unos centímetros pero toma algún tiempo antes de que el Sistema esté totalmente adaptado a las nuevas configuraciones.

La adaptación continua para lo deseado no es posible debido a las restricciones de las máquinas usadas y al tiempo que el sistema necesita para adaptarse a (pequeños) cambios. Por consiguiente, las configuraciones de la compuerta se revisan cada hora y si es necesario se cambian por una mejor predicción de las configuraciones necesarias de la compuerta.

Para la predicción del cambio necesario en las configuraciones de la compuerta, se usan las fórmulas para "Flujo Compuerta Sumergida (Submerged Gate Flow)". Casi siempre ocurre este tipo de flujo, de modo que se utiliza para la predicción. En algunos casos limitados ocurre un flujo diferente, donde las formulas aún sean aplicables, pero solo conducirán a una incertidumbre ligeramente mayor.

A continuación se presentan, primero, la nomenclatura y las formulas generales, seguido del método para calcular la predicción de las nuevas configuraciones de la compuerta. Al final, se presentan dos ejemplos para mostrar cómo funciona el Sistema.

Nomenclatura

Símbolo (T=T)	Símbolo (T=T+1)	Descripción
W_{gateX}	W_{gateX}	Ancho de la compuerta X (las tres compuertas tienen 20 metros de ancho).
$h_{up,T}$	$h_{up,T+1}$	Nivel de agua aguas arriba justo aguas arriba de las compuertas
$h_{do,T}$	$h_{do,T+1}$	Nivel de agua aguas abajo justo aguas abajo de las compuertas
$d_{gateX,T}$	$d_{gateX,T+1}$	Altura de la compuerta de apertura X
$A_{gateX,T}$	$A_{gateX,T+1}$	Área de la compuerta de apertura X
$A_{Total,T}$	$A_{Total,T+1}$	Área total de aberturas en todas las compuertas
$A_{f, gateX,T}$	$A_{f, gateX,T+1}$	Área húmeda de la compuerta de apertura X
$u_{s,T}$	$u_{s,T+1}$	Velocidad de flujo a través de la compuerta
$c_{w,T}$	$c_{w,T+1}$	Coefficiente de contracción lateral
μ_T	μ_{T+1}	Coefficiente de contracción
$Q_{gateX,T}$	$Q_{gateX,T+1}$	Descarga a través de la compuerta X
$Q_{Total,T}$	$Q_{Total,T+1}$	Descarga total a través de todas las compuertas

Formulas “Flujo de Compuerta Sumergido”

	Paso de Tiempo T	Paso de Tiempo T+1 hora
Velocidad:	$u_{s,T} = c_{w,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})}$	$u_{s,T+1} = c_{w,T+1} \sqrt{2g(h_{up,T+1} - h_{do,T+1})}$
Área húmeda:	$A_{f, gateX,T} = \mu_T W_{gateX} d_{gateX,T}$ $= \mu_T A_{gateX,T}$	$A_{f, gateX,T+1} = \mu_{T+1} W_{gateX} d_{gateX,T+1}$ $= \mu_{T+1} A_{gateX,T+1}$
Descarga:	$Q_{gateX,T}$ $= c_{w,T} \mu_T A_{gateX,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})}$ $Q_{Total,T} = \sum_{X=1}^3 Q_{gateX,T}$ $A_{Total,T} = \sum_{X=1}^3 A_{gateX,T}$	$Q_{gateX,T+1}$ $= c_{w,T+1} \mu_{T+1} A_{gateX,T+1} \sqrt{2g(h_{up,T+1} - h_{do,T+1})}$ $Q_{Total,T+1} = \sum_{X=1}^3 Q_{gateX,T+1}$ $A_{Total,T+1} = \sum_{X=1}^3 A_{gateX,T+1}$

$[c_w\mu]_{Total,T} = \frac{Q_{Total,T}}{A_{Total,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})}}$	$[c_w\mu]_{Total,T+1} = \frac{Q_{Total,T+1}}{A_{Total,T+1} \sqrt{2g(h_{up,T+1} - h_{do,T+1})}}$
---	---

Cambio deseado:	$h_{do,T+1} = h_{do,T} + dh_{do} \quad \text{and} \quad Q_{T+1} = Q_T + dQ$ <p>Dos suposiciones (permitidas debido a los pequeños cambios esperados dentro del paso del tiempo):</p> $h_{up,T+1} = h_{up,T}$ $[c_w\mu]_{Total,T} = [c_w\mu]_{Total,T+1}$												
Cambio en la apertura total de la compuerta:	$Q_{Total,T+1} - Q_{Total,T} = [c_w\mu]_{Total,T+1} A_{Total,T+1} \sqrt{2g(h_{up,T+1} - h_{do,T+1})} - [c_w\mu]_{Total,T} A_{Total,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})}$ $A_{Total,T+1} = \frac{[c_w\mu]_{Total,T} A_{Total,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})} + (Q_{T+1} - Q_T)}{[c_w\mu]_{Total,T+1} \sqrt{2g(h_{up,T+1} - h_{do,T+1})}}$ <p>Apertura máxima de la compuerta: 20 cm por encima del nivel del agua aguas arriba:</p> $A_{Total,T+1} = \min \left(A_{Total,T+1}, (h_{up,T} + 0.20) \sum_{X=1}^3 W_{gateX} \right)$												
Configuración de compuerta individual:	<p>La primera compuerta 1 se abrirá hasta 1 metro, seguida por la compuerta 2 y luego la compuerta 3. Cuando todas las compuertas tengan aberturas de 1 metro, las tres compuertas se abrirán más hacia el mismo nivel.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>$d_{gateA,T+1}$</th> <th>$d_{gateB,T+1}$</th> <th>$d_{gateC,T+1}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$if A_{Total,T+1} \leq W_{gateA}$</td> <td>$\frac{A_{Total,T+1}}{W_{gateA}}$</td> <td>0.00 m</td> <td>0.00 m</td> </tr> <tr> <td>$elseif A_{Total,T+1} \leq \sum_{X=A}^B W_{gateX}$</td> <td>1.00 m</td> <td>$\frac{A_{Total,T+1} - W_{gateA}}{W_{gateB}}$</td> <td>0.00 m</td> </tr> </tbody> </table>		$d_{gateA,T+1}$	$d_{gateB,T+1}$	$d_{gateC,T+1}$	$if A_{Total,T+1} \leq W_{gateA}$	$\frac{A_{Total,T+1}}{W_{gateA}}$	0.00 m	0.00 m	$elseif A_{Total,T+1} \leq \sum_{X=A}^B W_{gateX}$	1.00 m	$\frac{A_{Total,T+1} - W_{gateA}}{W_{gateB}}$	0.00 m
	$d_{gateA,T+1}$	$d_{gateB,T+1}$	$d_{gateC,T+1}$										
$if A_{Total,T+1} \leq W_{gateA}$	$\frac{A_{Total,T+1}}{W_{gateA}}$	0.00 m	0.00 m										
$elseif A_{Total,T+1} \leq \sum_{X=A}^B W_{gateX}$	1.00 m	$\frac{A_{Total,T+1} - W_{gateA}}{W_{gateB}}$	0.00 m										

	$elseif A_{Total,T+1} \leq \sum_{X=A}^C W_{gateX}$	1.00 m	1.00 m	$\frac{A_{Total,T+1} - (W_{gateA} + W_{gateA})}{W_{gateC}}$
	else	$\frac{A_{Total,T+1}}{\sum_{X=A}^C W_{gateX}}$	$\frac{A_{Total,T+1}}{\sum_{X=A}^C W_{gateX}}$	$\frac{A_{Total,T+1}}{\sum_{X=A}^C W_{gateX}}$

Ejemplo 1

Situación actual:	$h_{up,T} = 5.00msnm$ $h_{do,T} = 2.20msnm$ $d_{gateA,T} = 0.78m, d_{gateB,T} = 0.00m, d_{gateC,T} = 0.00m$ $A_{Total,T} = 15.7m^2$ $Q_{Total,T} = 73m^3/s \text{ (measured)}$ $[c_w\mu]_{Total,T} = \frac{Q_{Total,T}}{A_{Total,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})}} = \frac{73}{15.7 \sqrt{2g(5.0 - 2.2)}} = 0.63$								
Situación deseada:	$h_{up,T+1} = 5.00msnm$ $h_{do,T+1} = 2.25msnm$ $Q_{T+1} = 76m^3/s \text{ (based on Q/H - relation from model)}$ <p style="text-align: center;">Supuestos:</p> $h_{up,T+1} = h_{up,T} = 5.00$ $[c_w\mu]_{Total,T} = [c_w\mu]_{Total,T+1} = 0.63$								
Cambio en la compuerta:	$A_{gate,T+1} = \frac{c_w\mu A_{gate,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})} + (Q_{T+1} - Q_T)}{c_w\mu \sqrt{2g(h_{up,T+1} - h_{do,T+1})}}$ $A_{gate,T+1} = \frac{0.63 \times 15.7 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times (5.00 - 2.20)} + (76 - 73)}{0.63 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times (5.00 - 2.25)}} = 16.5m^2$								
Configuración individual de la compuerta:	<p>Primero, la compuerta A se abrirá hasta 1 metro, seguida por la compuerta B y luego la compuerta C. Cuando todas las compuertas tengan aberturas de 1 metro, las compuertas se abrirán aún más, juntas.</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>$d_{gateA,T+1}$</td> <td>$d_{gateB,T+1}$</td> <td>$d_{gateC,T+1}$</td> </tr> <tr> <td>$if A_{Total,T+1} \leq W_{gateA}$</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </table>		$d_{gateA,T+1}$	$d_{gateB,T+1}$	$d_{gateC,T+1}$	$if A_{Total,T+1} \leq W_{gateA}$	—	—	—
	$d_{gateA,T+1}$	$d_{gateB,T+1}$	$d_{gateC,T+1}$						
$if A_{Total,T+1} \leq W_{gateA}$	—	—	—						

	$elseif A_{Total,T+1} \leq \sum_{X=A}^B W_{gateX}$	0.83 m	0.00 m	0.00 m
	$elseif A_{Total,T+1} \leq \sum_{X=A}^C W_{gateX}$	–	–	–
	o	–	–	–
	Cambio de las compuertas	+ 0.05m	–	–

Ejemplo 2

Situación actual:	$h_{up,T} = 5.00msnm$ $h_{do,T} = 4.00msnm$ $d_{gateA,T} = 1.58m, d_{gateB,T} = 1.58m, d_{gateC,T} = 1.58m$ $A_{Total,T} = 94.8m^2$ $Q_{Total,T} = 286m^3/s \text{ (measured)}$ $[c_w\mu]_{Total,T} = \frac{Q_{Total,T}}{A_{Total,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})}} = \frac{286}{94.8 \sqrt{2g(5.0 - 4.0)}} = 0.68$				
Situación deseada:	$h_{up,T+1} = 5.00msnm$ $h_{do,T+1} = 4.04msnm$ $Q_{T+1} = 293m^3/s \text{ (based on Q/H - relation from model)}$ <p>Supuestos:</p> $h_{up,T+1} = h_{up,T} = 5.00$ $[c_w\mu]_{Total,T} = [c_w\mu]_{Total,T+1} = 0.68$				
Cambio en compuerta:	$A_{gate,T+1} = \frac{c_w\mu A_{gate,T} \sqrt{2g(h_{up,T} - h_{do,T})} + (Q_{T+1} - Q_T)}{c_w\mu \sqrt{2g(h_{up,T+1} - h_{do,T+1})}}$ $A_{gate,T+1} = \frac{0.68 \times 94.8 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times (5.00 - 4.00)} + (293 - 286)}{0.68 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times (5.00 - 4.04)}} = 99.1m^2$				
Ajustes individuales de la compuerta:	<p>Primero, la compuerta A se abrirá hasta 1 metro, seguida por la compuerta B y luego la compuerta C. Cuando todas las compuertas tengan aberturas de 1 metro, las compuertas se abrirán aún más, juntas.</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>$d_{gateA,T+1}$</td> <td>$d_{gateB,T+1}$</td> <td>$d_{gateC,T+1}$</td> </tr> </table>		$d_{gateA,T+1}$	$d_{gateB,T+1}$	$d_{gateC,T+1}$
	$d_{gateA,T+1}$	$d_{gateB,T+1}$	$d_{gateC,T+1}$		



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



	$if A_{Total,T+1} \leq W_{gateA}$	-	-	-
	$elseif A_{Total,T+1} \leq \sum_{X=A}^B W_{gateX}$	-	-	-
	$elseif A_{Total,T+1} \leq \sum_{X=A}^C W_{gateX}$	-	-	-
	o	1.65m	1.65m	1.65m
	Cambio de las compuertas	+ 0.07m	+ 0.07m	+ 0.07m



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



**APÉNDICE 3: DIAGRAMAS DE FLUJO PARA EL CONTROL DE LAS
COMPUERTAS**

DIAGRAMA DE FLUJO PARA LAS COMPUERTAS DE CALAMAR

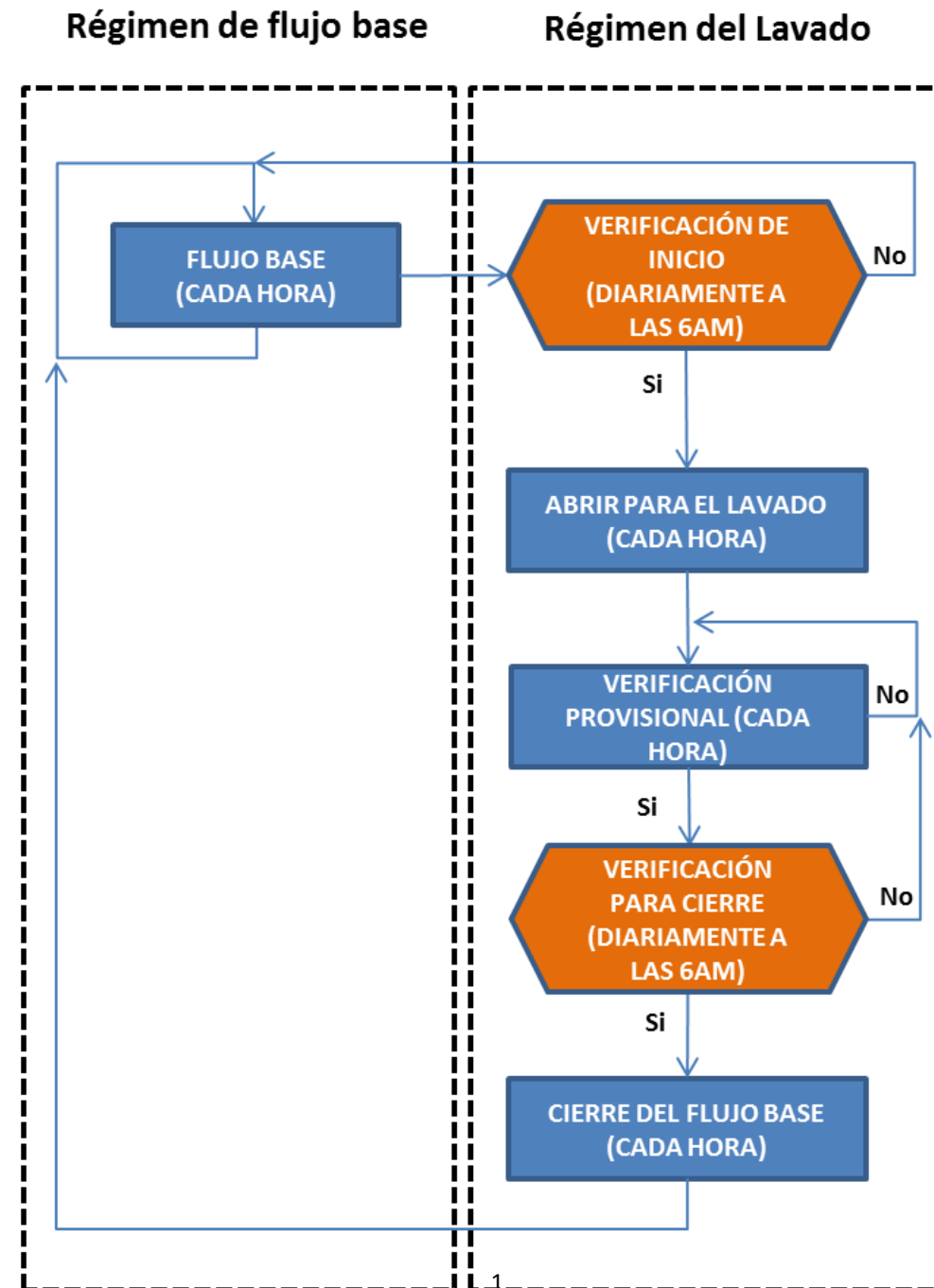


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LAS COMPUERTAS DE CALAMAR
VERIFICACIÓN DE INICIO Y FLUJO BASE

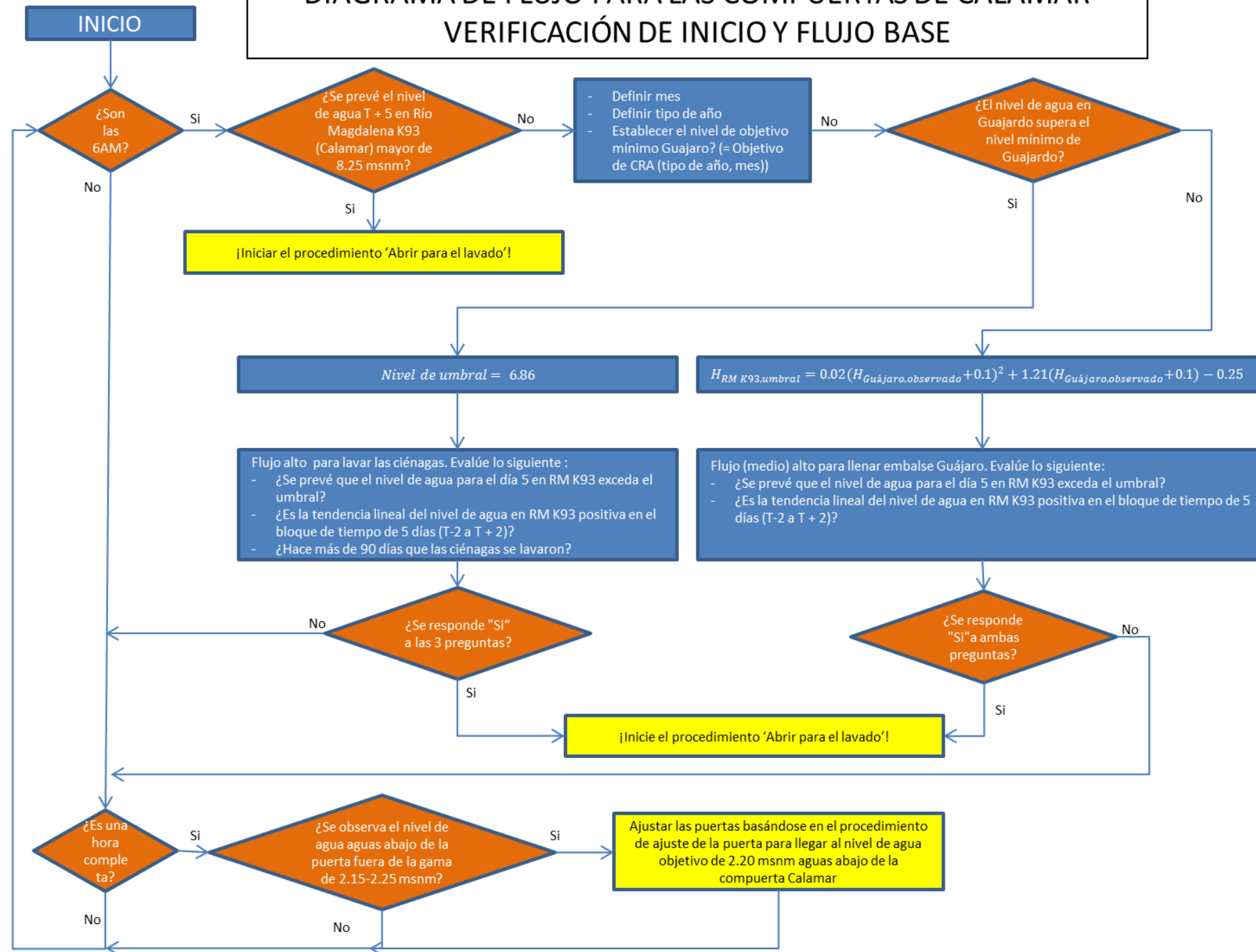
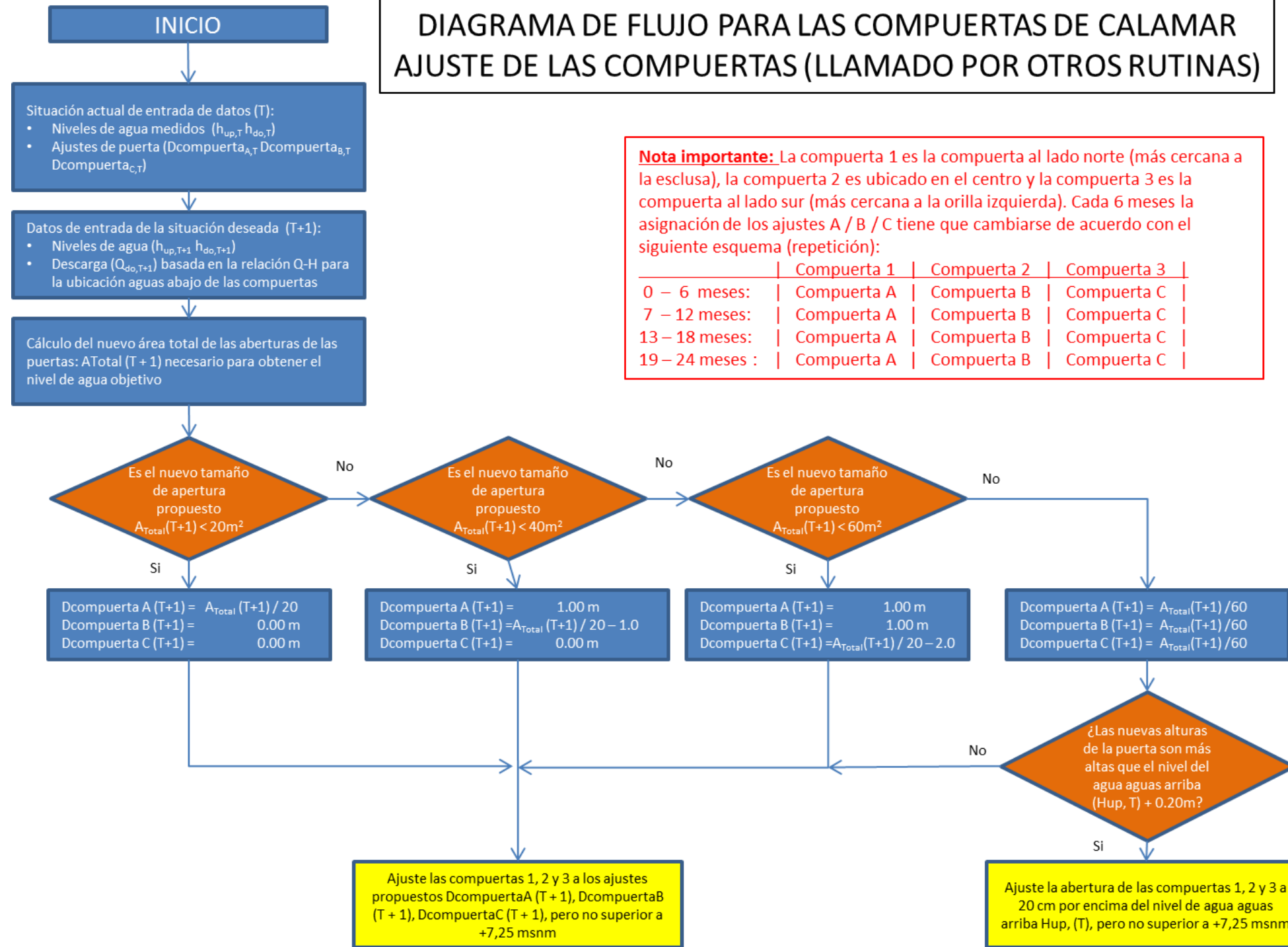


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LAS COMPUERTAS DE CALAMAR
AJUSTE DE LAS COMPUERTAS (LLAMADO POR OTROS RUTINAS)



**DIAGRAMA DE FLUJO PARA LAS COMPUERTAS DE CALAMAR
 ABRIR PARA EL LAVADO**

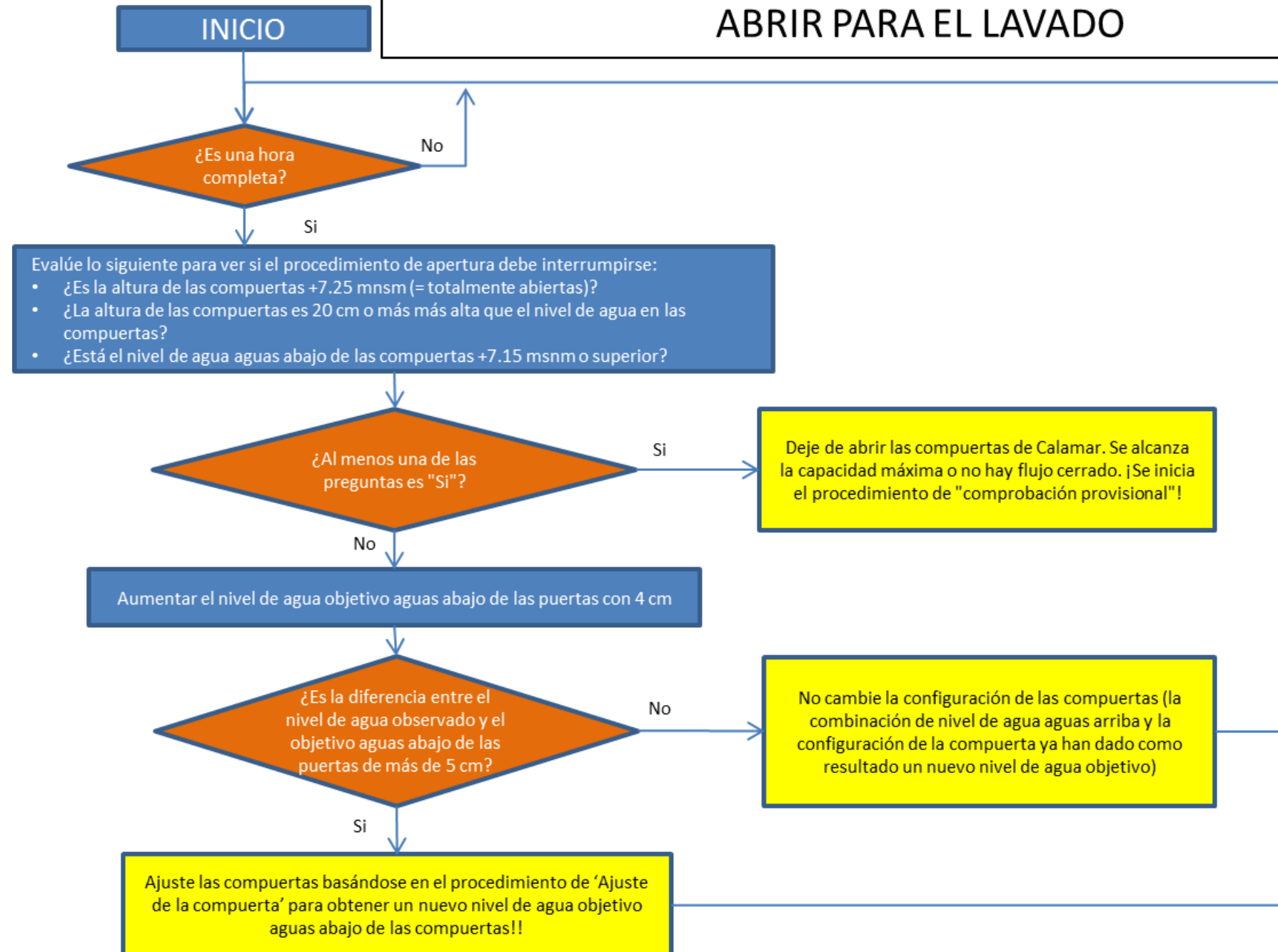
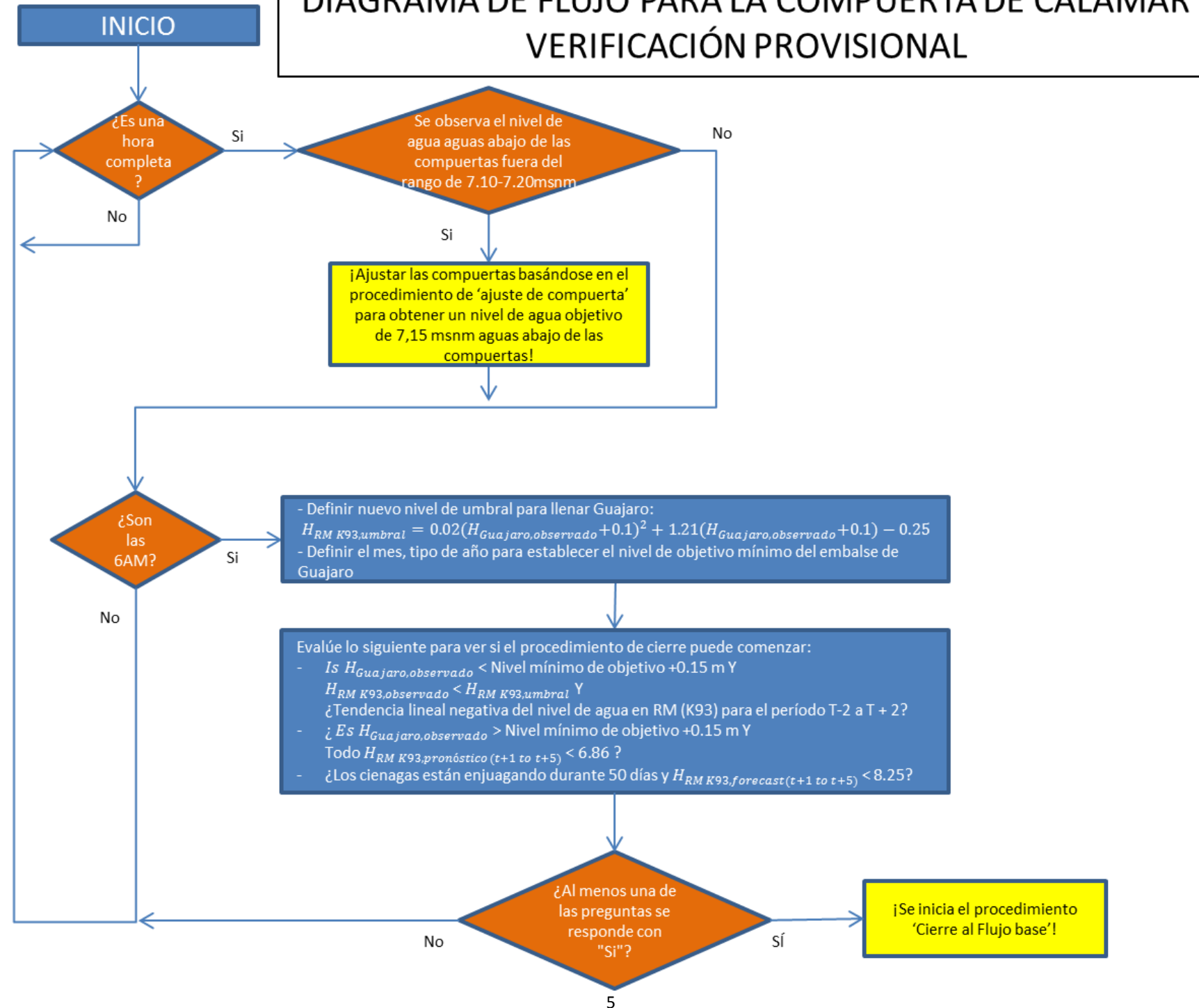


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA COMPUERTA DE CALAMAR
VERIFICACIÓN PROVISIONAL



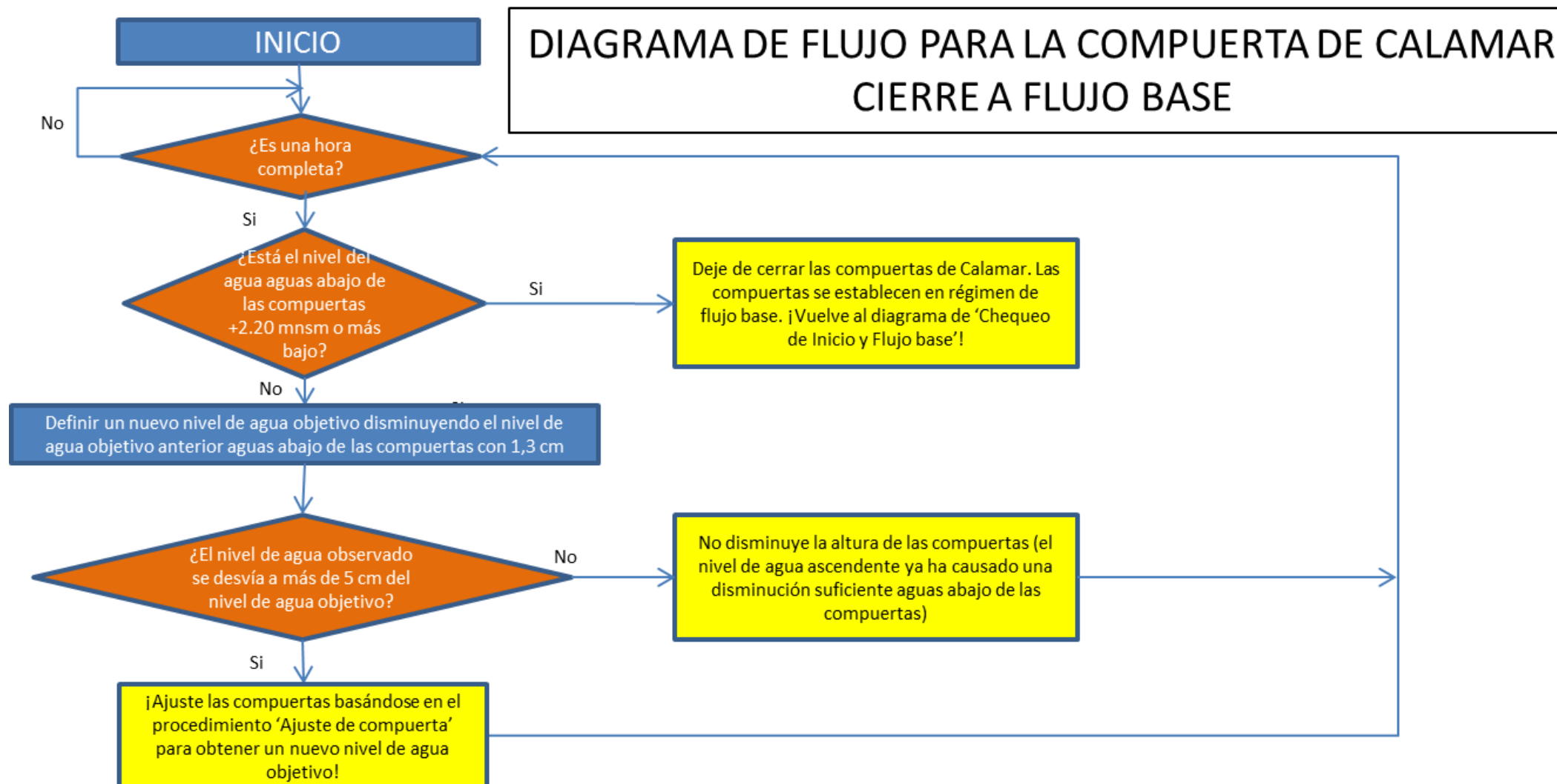
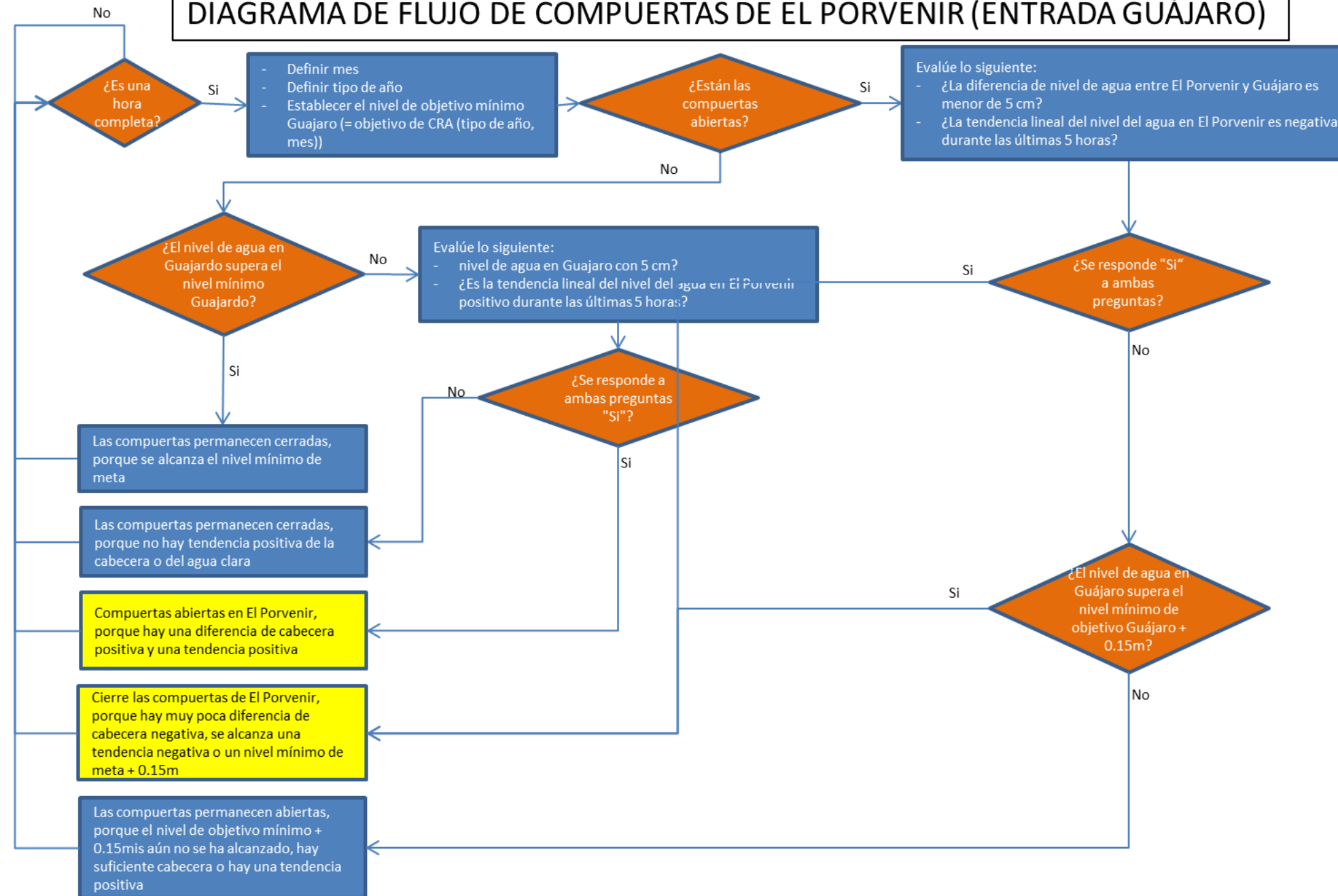


DIAGRAMA DE FLUJO DE COMPUERTAS DE EL PORVENIR (ENTRADA GUÁJARO)



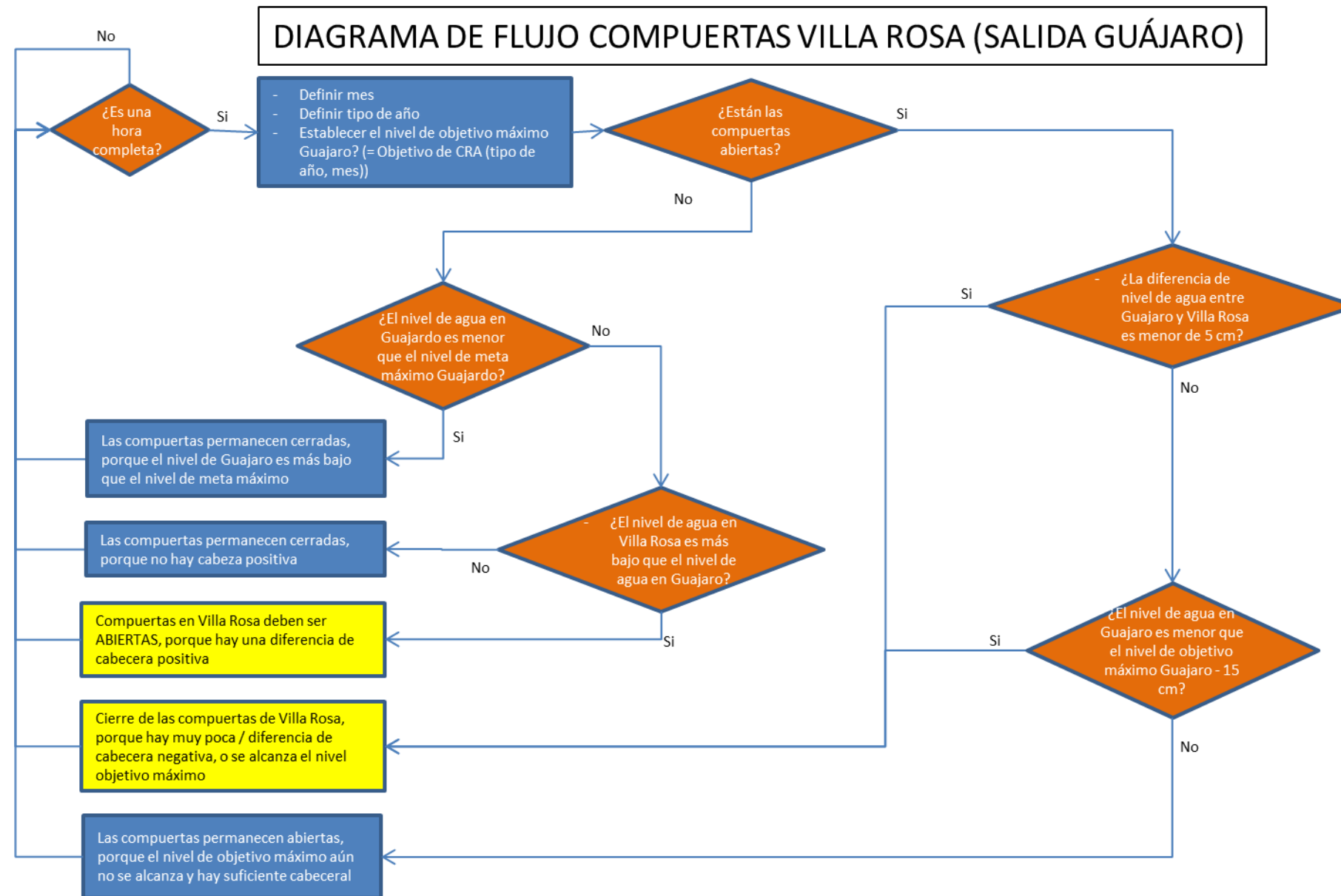


DIAGRAMA DE FLUJO (B1) ESTRUCTURA DE ENTRADA/SALIDA - CIÉNAGA HOBO

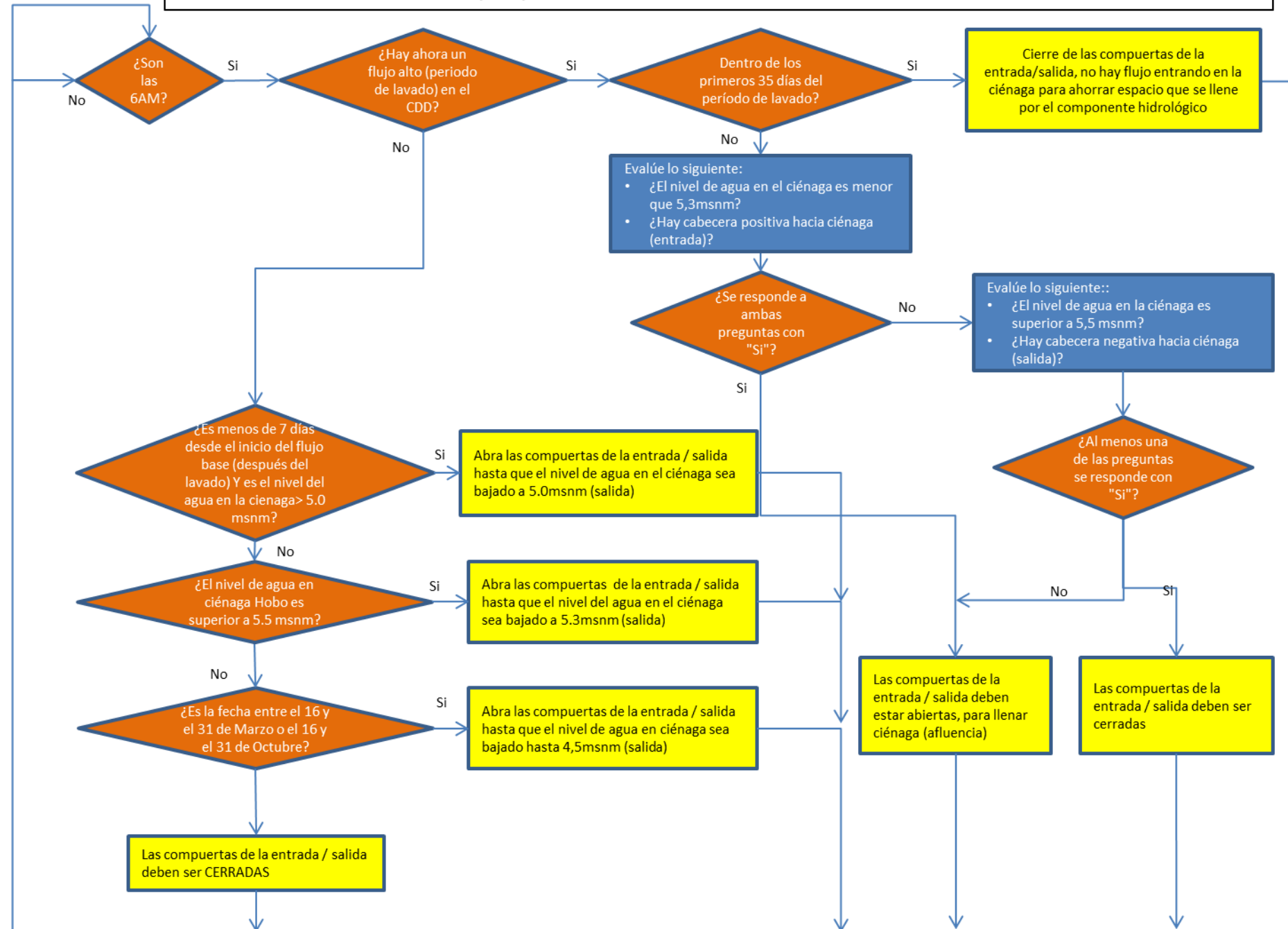


DIAGRAMA DE FLUJO (B1) ESTRUCTURA DE ENTRADA (A1) – DIQUE VIEJO

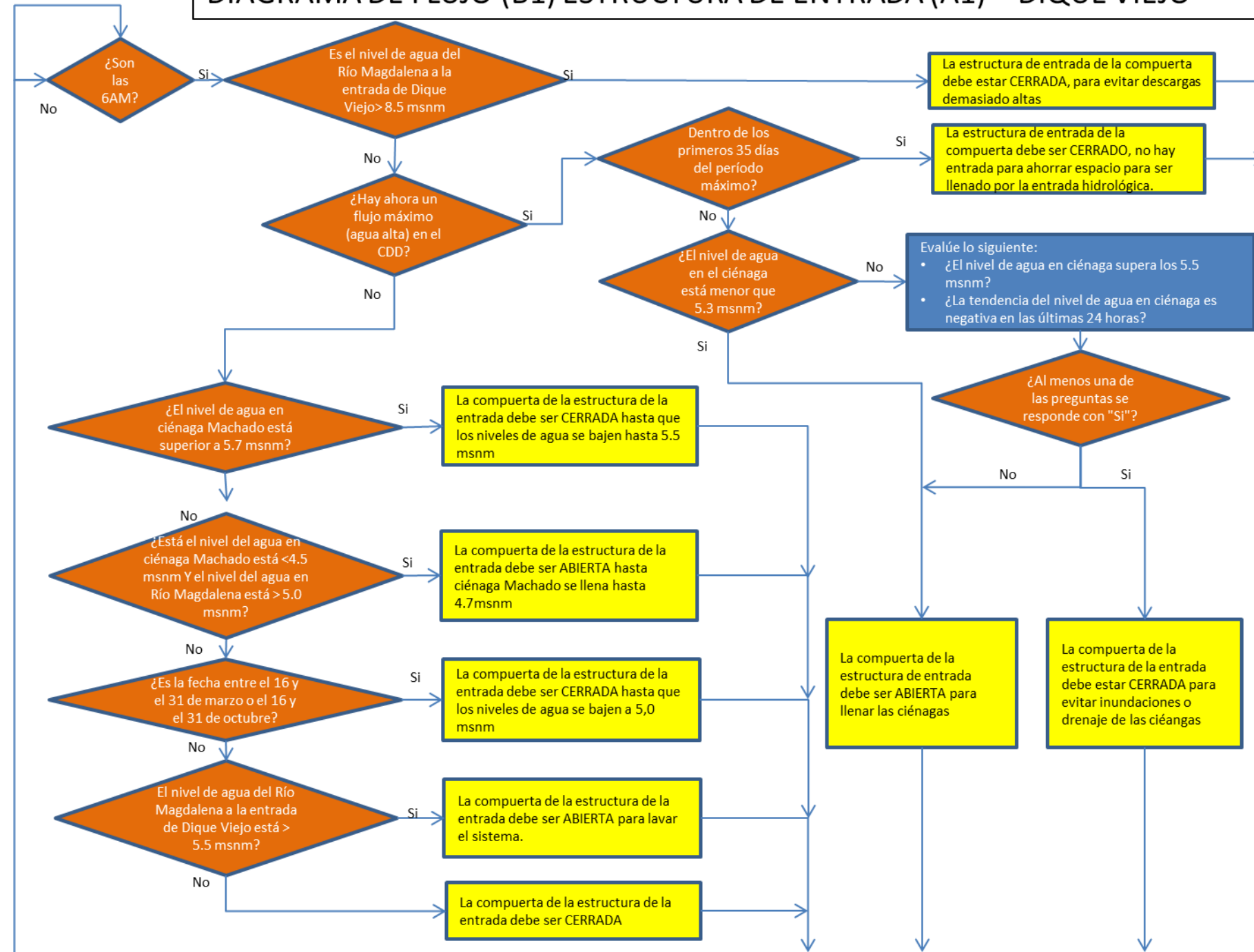
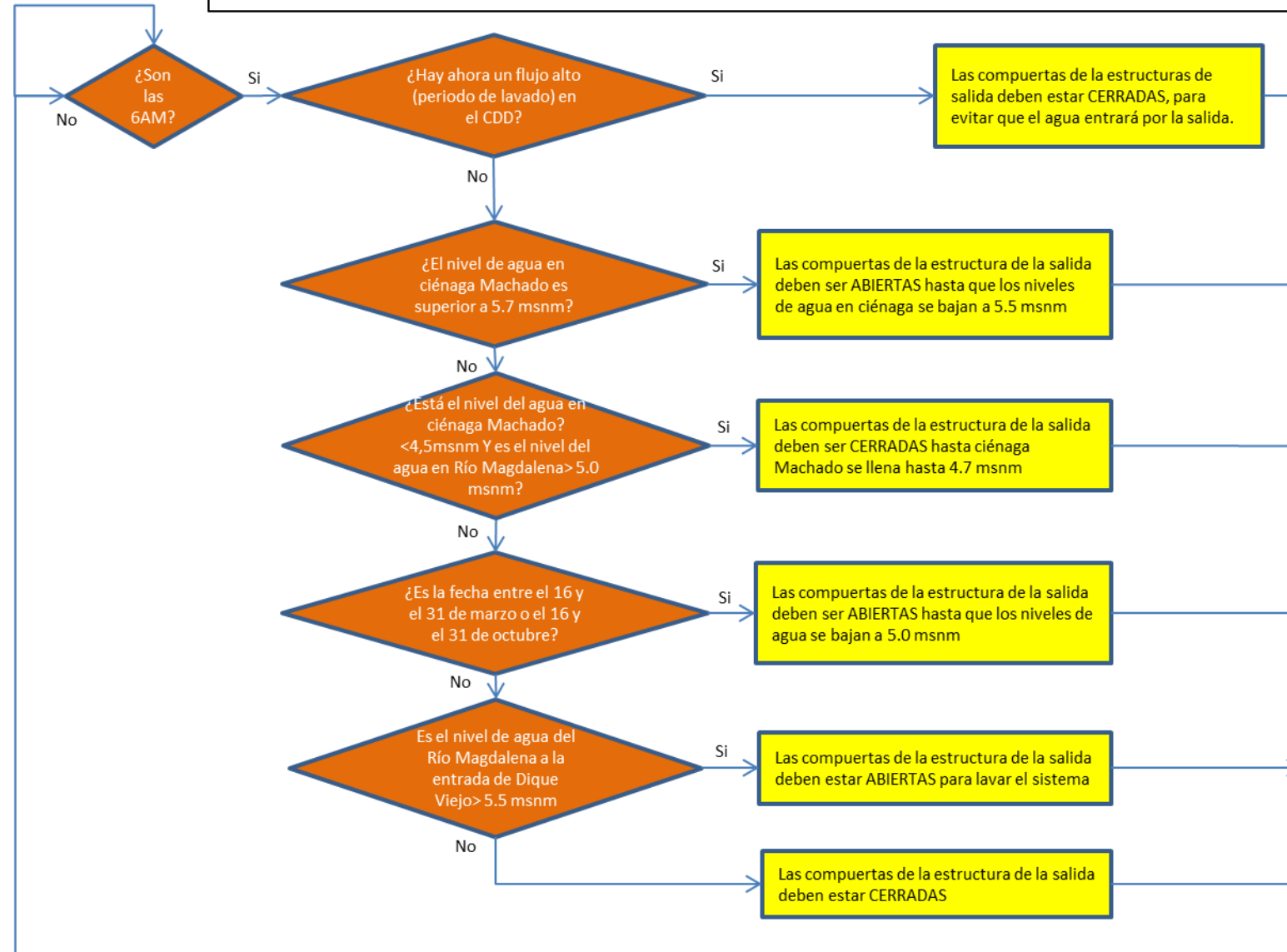


DIAGRAMA DE FLUJO ESQUEMA DE SALIDA (A8) - DIQUE VIEJO





PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



APÉNDICE 4: MODELO DE PRONÓSTICO DE REGRESIÓN MULTILINEAL PARA CALAMAR, COLOMBIA

Existen varias obras de infraestructura importante dentro del Proyecto del Canal del Dique (CDD) en Colombia. Las compuertas en Calamar se consideran las estructuras más importantes que regulan la gestión de agua en el sistema CDD ya que controlan la cantidad del volumen de agua que ingresa al sistema. La gestión de control de agua consiste en esquemas complejos de toma de decisiones para salvaguardar la operación correcta de las compuertas. El nivel de agua en el Río Magdalena es una importante variable que impulsa la operación de estas compuertas. La capacidad de pronosticar este nivel de agua provee información que contribuye a tomar la decisión de abrir las compuertas de Calamar antes de que se llegue al nivel umbral del Río Magdalena. Sin un pronóstico, el Sistema solo puede ser controlado usando mediciones en tiempo real que significa que las compuertas de Calamar se abren cuando se llega al valor del umbral. La desventaja de este enfoque es que el primer par de días de la onda de inundación no puede ser usado para lavar las ciénagas y/o llenar Guájaro, considerando que la abertura completa de la compuerta de Calamar puede tomar hasta 5 días. La capacidad de pronosticar el nivel de agua en el Río Magdalena maximiza el uso de la onda de inundación, lo cual está de acuerdo con el objetivo de utilizar todas las posibilidades de abrir la compuerta de Calamar para llenar Guájaro y/o lavar las ciénagas. El presente memo describe el proceso de desarrollo de diez modelos de predicción para diez horizontes temporales de predicción.

Se han desarrollado diez modelos de regresión multilineal para pronosticar los niveles de agua en Calamar, Colombia. Con los datos del nivel de agua de 10 estaciones limnimétricas como información de entrada, estos modelos pronostican el nivel de agua de uno a diez días en adelante.



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



7.1 Concepto

El pronóstico del nivel de agua se desarrolla usando el modelo de regresión multilínea (black-box). El nivel de agua en Calamar en un futuro se describe como una función (lineal) de los niveles de agua de varias estaciones limnimétricas del pasado que se pueden redactar de la siguiente manera:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + e_i$$

En donde y_i denota el *regresor*, el nivel de agua en Calamar en un momento determinado en el futuro y x_{pi} denota varios *pronosticadores*, datos del nivel de agua en diferentes estaciones limnimétricas en diferentes momentos (pasados) en el tiempo (desfases). El β_p son los *coeficientes de regresión* de cada pronosticador y el e_i denota los *residuales* del modelo.

La De cada estación, se usan en total 6 diferentes desfases de tiempo como input para el modelo de regresión; el nivel de agua en T0 y 1 a 5 días atrás en el tiempo (ver área azul en la Figura 38).

muestra la línea de tiempo que se usa para este estudio. El área azul muestra las marcas temporales que se usan como datos de entrada (pronosticadores) los cuales se usan para crear 10 modelos de regresión para cada marca de tiempo en el futuro (área roja).

Dado que todas las variables de entrada, en este caso, están correlacionadas (físicamente), los modelos de regresión sufrirán de *multicolinealidad*. Eso quiere decir que, definitivamente, usar todas las variables disponibles de entrada con múltiples desfases de tiempo como pronosticadores en el modelo de regresión no será el mejor modelo ya que agregar más variables incrementará la multicolinealidad. Esto no es lo que se prefiere ya que el error de los coeficientes de regresión puede volverse muy grande y producir un sobreajuste del modelo para el juego de datos de calibración (haciendo el modelo menos genérico). Por consiguiente, se requiere un subconjunto de variables de entrada que conducirán al modelo de pronóstico más óptimo. Considerando que el número de subconjuntos es enorme, se usa la técnica de regresión

escalonada para una selección inteligente de variables de entrada; los pronosticadores son agregados y retirados de manera secuencial de tal manera que el modelo total de regresión mejore.

La regresión escalonada es un método sistemático para agregar y retirar términos de un modelo multilineal en base a su significado estadístico en una regresión. El método comienza con un modelo inicial y luego compara el poder explicativo de los modelos paulatinamente más grandes y más pequeños. Primero, el método verifica si algún término que aún no esté en el modelo tiene valores-p del estadístico-F menores que la tolerancia de entrada de (en este caso) 0.02. De modo que, si no es probable que los términos tengan un coeficiente cero si se agregan al modelo, se agrega el término con el valor p más pequeño, después de lo cual se repite cada paso. Entonces, el método verifica si los términos del modelo tienen valores-p de una estadística-F mayores que la tolerancia de salida de (en este caso) 0.03. De modo que, si no es probable que la hipótesis de un coeficiente cero se pueda rechazar, el término con el valor-p más grande es retirado.

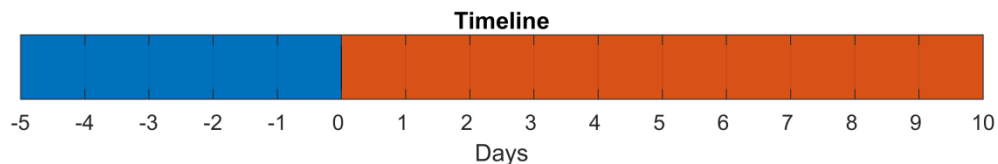


Figura 44: Línea temporal de los modelos de regresión, el área azul se usa como información para el modelo de regresión; el rojo son diferentes variables de output para modelos consecutivos.

7.2 Datos de entrada

Para evitar un gran número de pronosticadores en el modelo de regresión final se ha realizado una selección de todas las estaciones limnimétricas disponibles. El nivel de agua, y no la descarga, se usa como variable predictiva aunque se sabe que, en general, la descarga se comporta de manera más lineal que el nivel de agua. Aun así se escoge el nivel de agua para este propósito porque la disponibilidad de los datos



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



de nivel de agua es mayor que los datos de descarga. Además, el nivel de agua se obtiene a través de la medición directa en campo mientras que la descarga es un derivado de las mediciones de nivel de agua, una conocida relación descarga-nivel de agua (aunque cambiante y a veces desactualizada), que introduce un error potencial tanto en los datos de entrada como en la conversión de los datos de salida de nuevo a los niveles de agua. Por consiguiente, se han seleccionado diez estaciones limnimétricas en base a la disponibilidad de datos, ubicación geográfica y presencia de estaciones automatizadas. Estas estaciones miden los niveles de agua a diario. La Figura 45 muestra las estaciones limnimétricas seleccionadas. Cabe observar que esto también incluye la estación Calamar.

Dado que la regresión es, en general, sensible para los valores atípicos, todas las series temporales de entrada para estas 10 estaciones limnimétricas se han procesado retirando los valores atípicos de los datos de entrada. En este caso, un valor atípico se define en base a la gradiente del nivel de agua en el tiempo. Luego de algunas reiteraciones, fue evidente que al retirar los puntos de datos del nivel de agua que muestran una diferencia de nivel de más de 90 cm en un día, el modelo de predicción es óptimo.

Para cada estación se usan en total 6 desfases de tiempo diferentes como información de entrada para el modelo de regresión; el nivel de agua en T_0 y de 1 hasta 5 días atrás en el tiempo (ver área azul en la De cada estación, se usan en total 6 diferentes desfases de tiempo como input para el modelo de regresión; el nivel de agua en T_0 y 1 a 5 días atrás en el tiempo (ver área azul en la Figura 38).

). Esto conduce a un total de 60 parámetros de entrada diferentes y pronosticadores potenciales para los modelos de regresión.



Figura 45: Estaciones limnimétricas utilizadas para los modelos de regresión multilínea

7.3 Modelos de regresión

La regresión escalonada se realiza usando las series temporales de 1990-2010 (calibración), mientras que la validación se hace usando las series temporales de 1980-1990. Es importante que para realizar la validación se usen otras series temporales que para la calibración para poder asegurar que se detecte un sobreajuste de los modelos (debido a la multicolinealidad). Debería haber un balance en la cantidad de datos utilizados para la calibración y la validación, dado que el rendimiento del modelo se incrementa cuando se usan series temporales más prolongadas para la calibración.



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



En general, se encontró que para el Sistema del Río Magdalena es adecuado utilizar el nivel de agua como parámetro predictivo. No hay evidencia de que los modelos de regresión hayan rendido mejor cuando se utilizó la descarga como parámetro.

La Figura 46 muestra los resultados del modelo de regresión para el horizonte temporal de previsión T+1. Claramente, los resultados son muy buenos considerando el Error de Raíz Cuadrático (RMSE) relativamente bajo de 2.1 cm para las series temporales completas de calibración. Cabe observar que para algunos períodos la disponibilidad de datos no fue suficiente para pronosticar el nivel de agua en Calamar. La Figura 47 muestra el pronóstico del nivel de agua en Calamar usando el modelo generado de regresión para las series temporales de validación en comparación con los niveles de agua observados. Tal parece que el modelo se desempeña muy bien para la validación, ya que el RMSE es aún más bajo comparado con el RMSE de los datos de calibración.

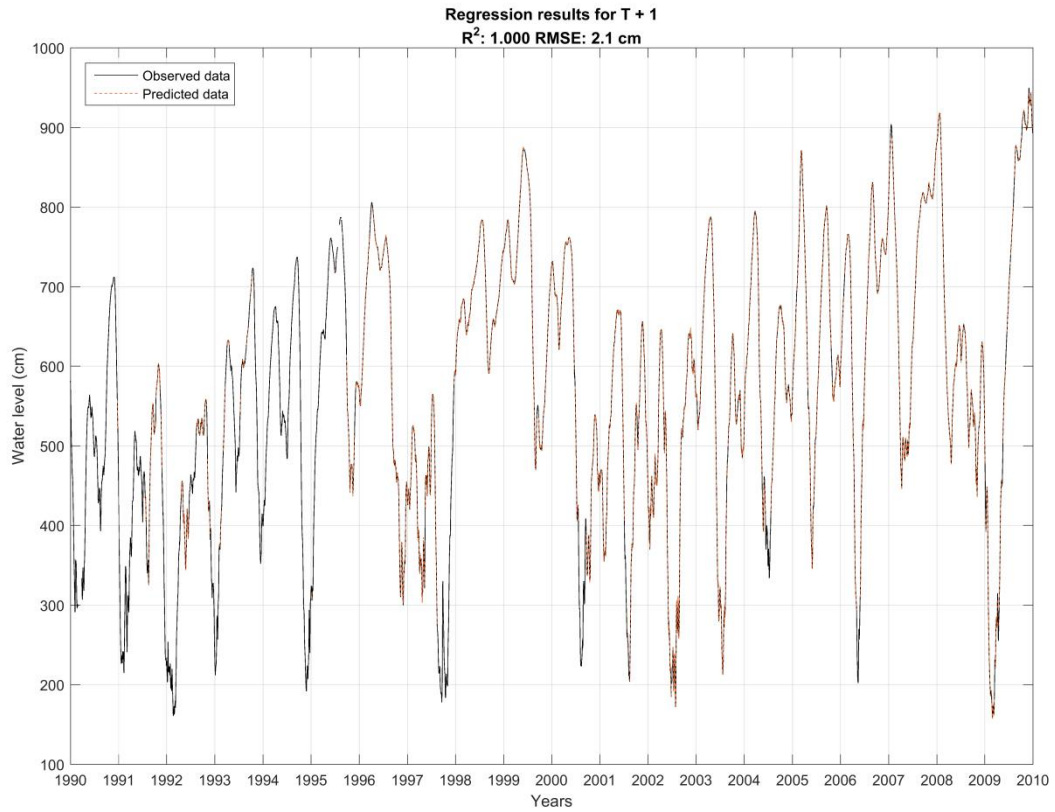


Figura 46: Resultados de regresión para el horizontal temporal de pronóstico T+1 sobre los datos de calibración

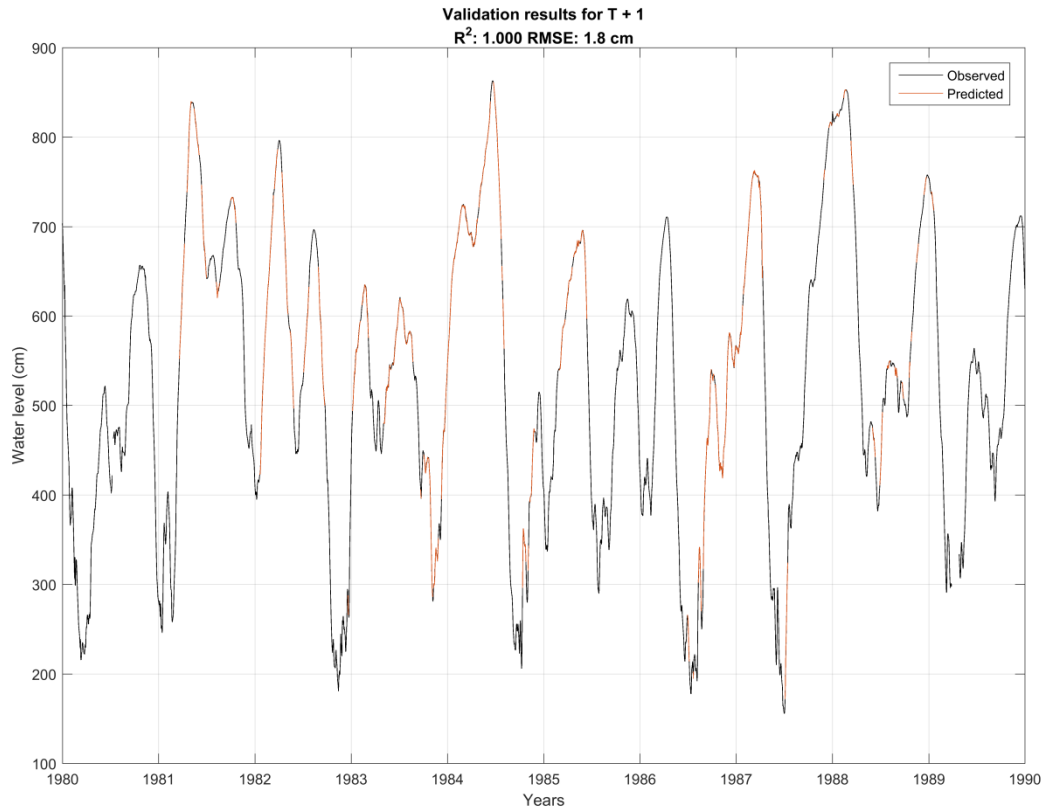


Figura 47: Resultados de validación para el horizonte temporal de previsión T+1

La Tabla 8 muestra un resumen de resultados de regresión para los diferentes modelos para los 10 horizontes temporales de previsión. Tal como se esperaba, el error RMSE aumenta para desfases de tiempo más largos, pero aún es muy aceptable considerando su desfase de tiempo. Para cada modelo, los datos de validación mostraron un valor RMSE aún menor, en comparación al modelo inicial. Esto quiere decir que el poder de previsión de los modelos es razonablemente bueno. El número de pronosticadores oscila entre 23 y 31 y se considera extenso, lo cual, dado su dependencia mutua, sugiere que la multi-colinealidad está muy presente entre los pronosticadores. Sin embargo, los valores RMSE



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



pequeños de la validación muestran que esto no representa una gran preocupación.

Los coeficientes de regresión, incluyendo la constante (*intercept*), se muestran en la Tabla 10 a la

Tabla 19 para los 10 modelos de regresión. Aunque se ha encontrado una tendencia física (por ejemplo, los datos del nivel de agua en Puerto Salgar, que se ubica más lejos de Calamar, tiene coeficientes de regresión en aumento con desfases de tiempo (futuro) en aumento) se observa que el modelo es definitivamente un modelo 'black-box' y no se basa completamente en relaciones físicas.

Tabla 8: Resumen de resultados de regresión para los diez modelos

Modelo	T + 1	T + 2	T + 3	T + 4	T + 5	T + 6	T + 7	T + 8	T + 9	T + 10
Número de pronosticadores	24	26	28	31	28	27	27	25	25	23
Modelo R ²	0.999 8	0.999 5	0.998 8	0.997 5	0.995 5	0.992 6	0.989 0	0.984 7	0.979 9	0.974 5
Modelo RMSE (cm)	2.0	3.5	5.3	7.6	10.3	13.1	16.0	18.9	21.8	24.5
Validación R ²	0.999 8	0.999 4	0.998 6	0.997 4	0.995 5	0.992 7	0.989 5	0.985 1	0.979 1	0.972 6
Validación RMSE (cm)	1.8	3.3	5.0	6.7	9.2	11.7	14.0	16.8	19.8	22.6

7.4 Pronóstico probabilístico

Los modelos de regresión presentados son modelos de pronóstico determinísticos, estadísticos ya que solo proveen una simple predicción del nivel de agua para un momento determinado en el tiempo y usan relaciones estadísticas. Sin embargo, con el uso de algunas técnicas de post-procesamiento es posible determinar la incertidumbre de la predicción, lo cual a su vez se puede usar para el pronóstico probabilístico.

Los percentiles de los residuales se encuentran por medio de la regresión cuantil. La regresión normal se basa en la minimización del error *cuadrático*. La regresión cuantil se basa en la minimización del error *absoluto* y produce la *mediana* en lugar de la *media* como para la regresión normal. Los *percentiles* de muestra se pueden encontrar con el uso de errores de ponderación.



PROYECTO: Restauración del Sistema del Canal del Dique



La Figura 48 muestra la regresión cuantil para el modelo T+4 en el gráfico izquierdo para varios percentiles y en el lado derecho los percentiles impuestos en los residuales. De modo que los percentiles son dependientes (lineales) del nivel de agua pronosticado.

Por la Figura 48 queda claro que la incertidumbre para los niveles de agua baja es mayor que para los niveles de agua alta. Esta tendencia es encontrada en cada modelo de regresión.

Los percentiles (i) se pueden escribir en la fórmula;

$$p_i = a_i + b_i Y_{pred}$$

Las ordenadas en el origen (a_i) y los coeficientes (b_i) para todos los modelos se pueden encontrar en la Tabla 9.

Estas relaciones lineales se usan para crear el límite de confianza en los valores pronosticados. Se observa que este método provee un estimado lineal de los percentiles. Localmente, la verdadera incertidumbre puede ser diferente ya que la distribución de los residuales son siempre se relacionan de manera totalmente lineal con el nivel de agua pronosticado.

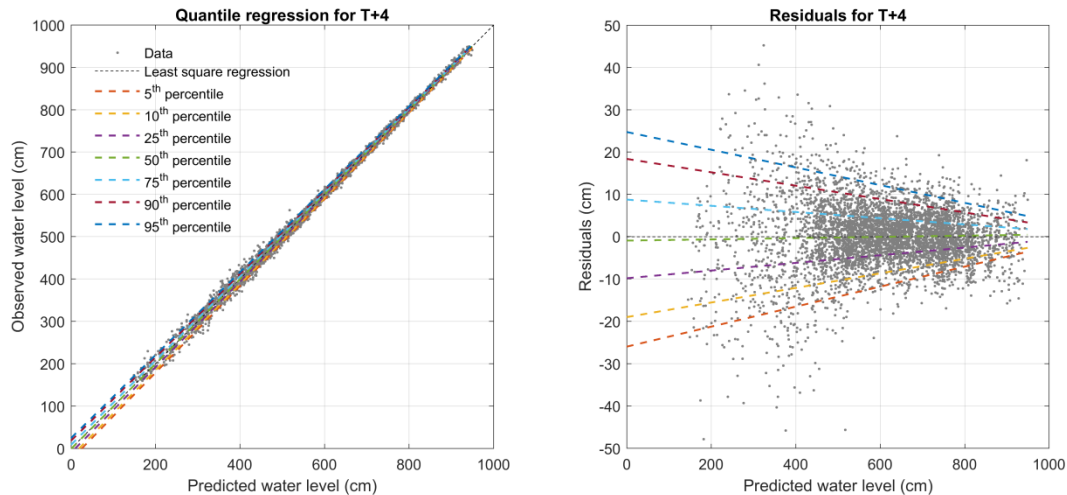


Figura 48: Ejemplo de regresión cuantil para el modelo T+4 a la izquierda e impuesto en los residuales a la derecha.

7.5 Resultados

La Figura 49, Figura 50, Figura 51 y Figura 52 muestran cuatro ejemplos del pronóstico de nivel de agua para momentos aleatorios en el tiempo. Cada ejemplo es un compuesto de los resultados de 10 modelos incluyendo los intervalos de confianza encontrados mediante la regresión cuantil. Queda claro que, en general, los pronósticos proveen una muy buena predicción para el primer par de horizontes temporales de predicción. Los pronósticos para 6 días en adelante, o más, muestran una tendencia que se desvía más de los niveles reales de agua que el pronóstico para los primeros 5 días. Esto se ajusta a los límites de confianza que muestran que la predicción también es más incierta para estos horizontes temporales ya que aumenta a medida que aumentan los horizontes temporales.

Los límites de confianza se pueden usar para evaluaciones de riesgo. Por ejemplo, el tope de 90% de límites de confianza define el nivel de agua que es superado con una probabilidad de 5%, y la probabilidad de que el nivel de agua sea inferior que el extremo inferior del 90% del límite de confianza es 5%.

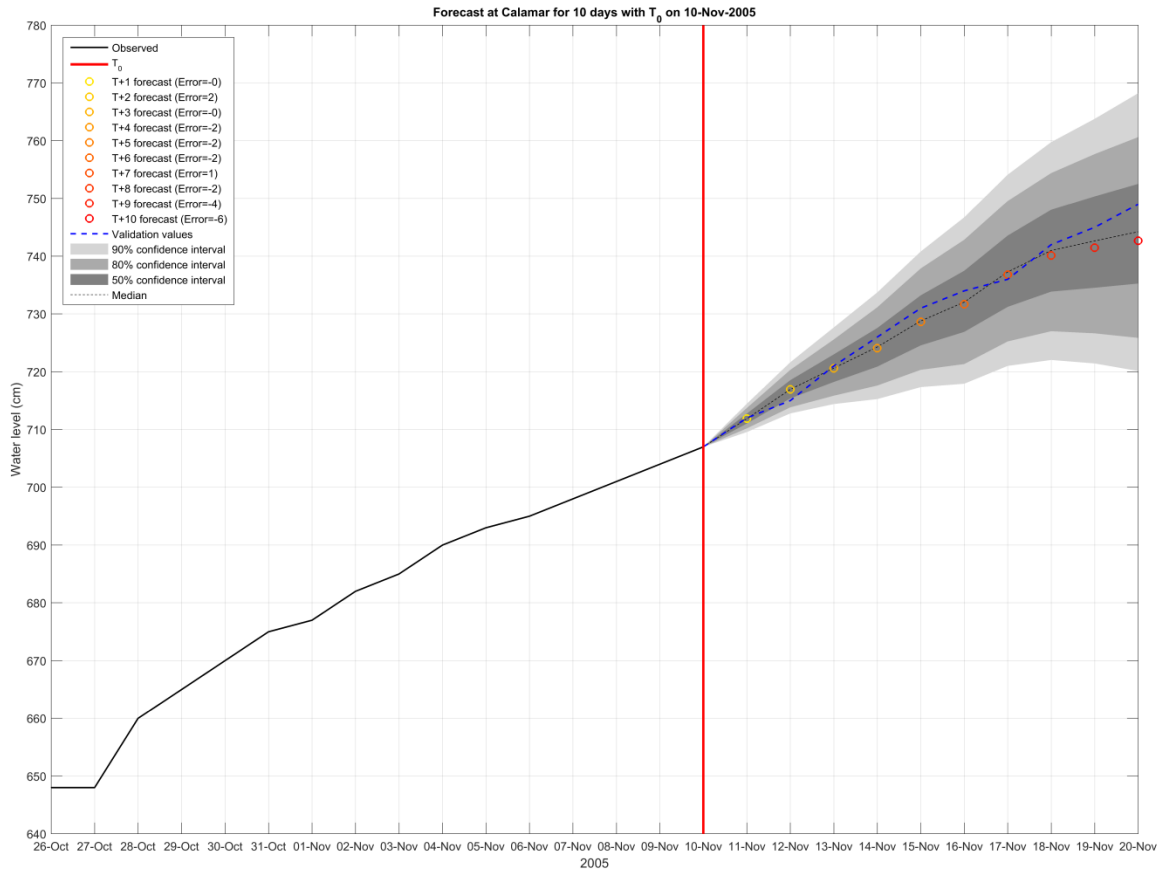


Figura 49: Ejemplo de pronóstico de nivel de agua con T_0 en noviembre 10 del 2005

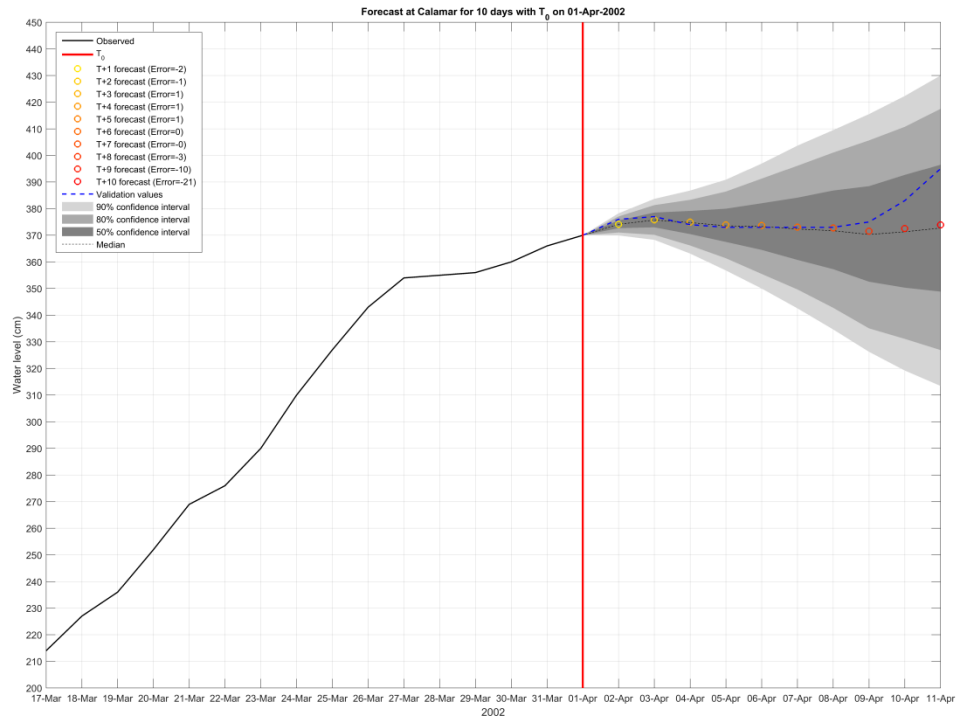


Figura 50: Ejemplo pronóstico nivel de agua con T0 el 1ro de abril, 2002

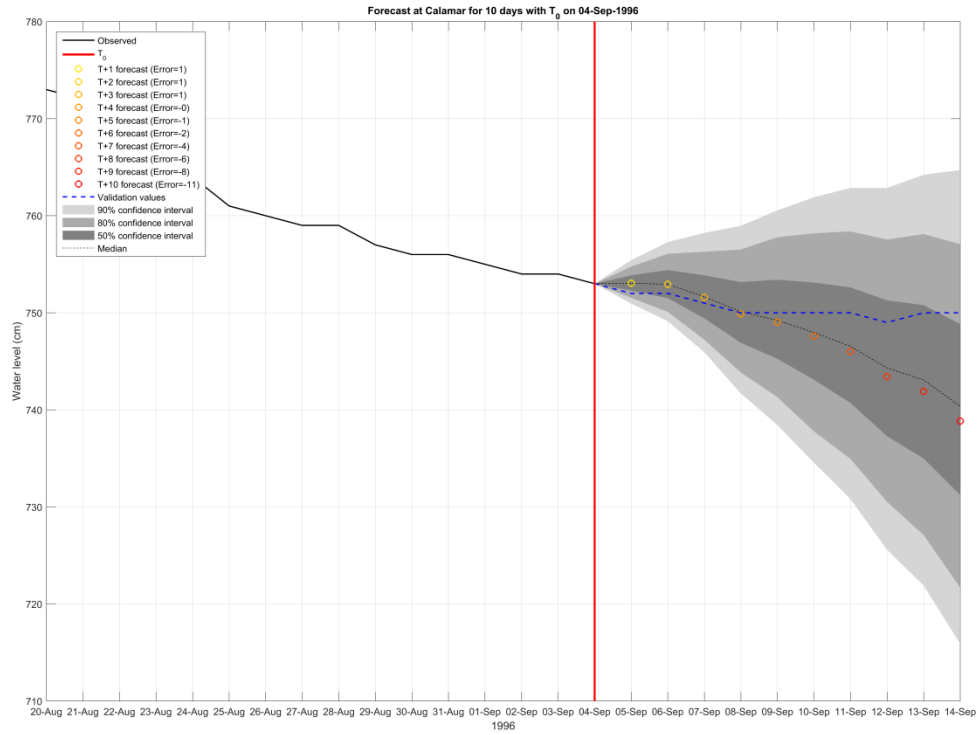


Figura 51: Ejemplo pronóstico nivel de agua con T0 el 4 de septiembre, 1996

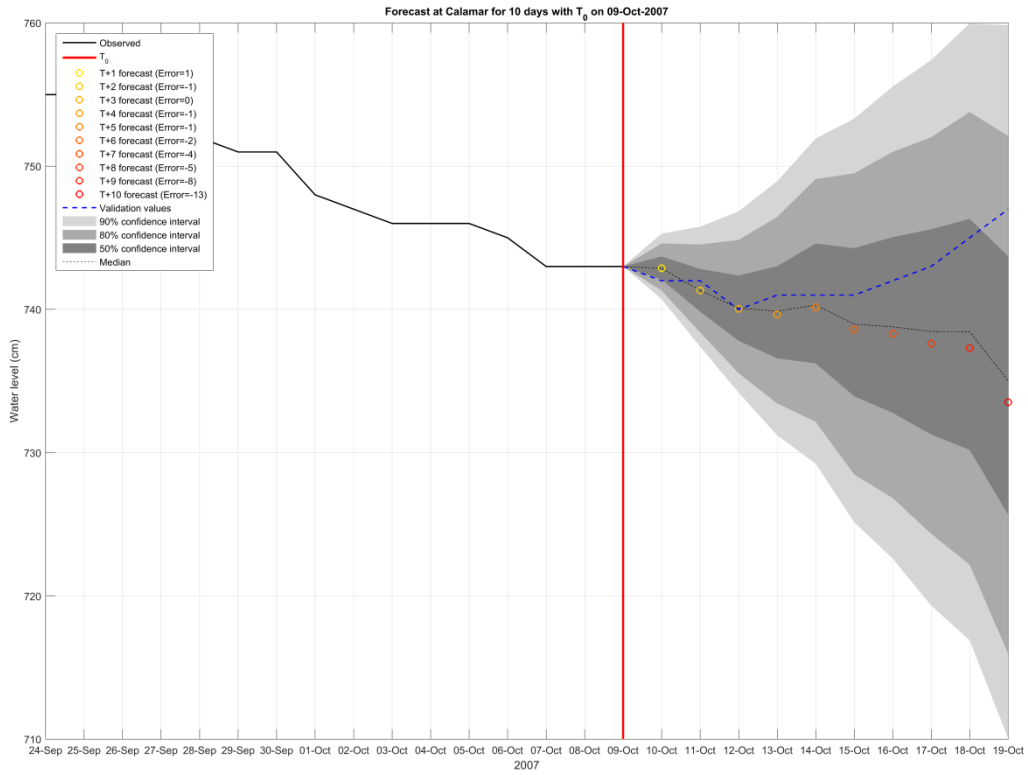


Figura 52: Ejemplo pronóstico nivel de agua con T_0 el 9 de octubre, 2007

Tabla 9: Coeficientes de regresión cuantil para varios percentiles para cada modelo

Percentil		5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th	95 th
T+1	a	-6.203	-4.568	-2.066	-0.001	2.120	4.170	5.842
	b	1.005	1.004	1.002	1.000	0.998	0.997	0.995
T+2	a	-11.082	-8.357	-4.177	-0.128	3.950	7.861	11.400
	b	1.010	1.007	1.004	1.000	0.997	0.994	0.991
T+3	a	-17.747	-13.180	-6.823	-0.445	6.088	11.975	17.066
	b	1.016	1.012	1.006	1.001	0.995	0.990	0.986
T+4	a	-25.958	-18.980	-9.799	-0.911	8.777	18.391	24.744
	b	1.024	1.017	1.009	1.001	0.993	0.984	0.979
T+5	a	-36.682	-28.615	-14.529	-0.974	12.245	26.561	34.912
	b	1.035	1.028	1.014	1.002	0.989	0.976	0.969
T+6	a	-47.821	-36.990	-20.026	-1.803	16.493	35.532	47.062
	b	1.046	1.036	1.021	1.003	0.985	0.967	0.956
T+7	a	-60.752	-48.659	-25.596	-2.517	21.513	44.598	56.862
	b	1.061	1.050	1.027	1.004	0.980	0.956	0.946
T+8	a	-72.887	-60.132	-31.755	-3.485	25.975	54.066	68.426
	b	1.074	1.064	1.034	1.006	0.975	0.946	0.934
T+9	a	-86.579	-68.175	-37.645	-3.676	31.412	60.727	77.691
	b	1.089	1.072	1.041	1.007	0.970	0.940	0.925
T+10	a	-98.604	-77.534	-42.876	-4.049	35.425	69.697	87.358
	b	1.102	1.082	1.048	1.008	0.966	0.930	0.916



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 10: Coeficientes de regresión modelo T+1

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.3010	-0.2395		-0.0735		
PLATO	0.0935	-0.0655	-0.0276			
MAGANGUE- ESPERANZA	0.2109	-0.1496	-0.0538			
SAN ROQUE	0.0452		-0.0521			0.0118
BANCO EL	0.0355			-0.0487		0.0169
VARAS LAS	0.0141	0.0262	-0.0300	-0.0268		0.0177
COQUERA LA- AUTOMAT		-0.0036			-0.0051	0.0071
BARRANCABE RMEJA-AU			-0.0048			
PTO BERRIO						
PTO SALGAR- AUTOM						
Intercept	-2.2076					



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 11: Coeficientes de regresión modelo T+2

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.4711	-0.3409		-0.1610		
PLATO	0.1711	-0.1243	-0.0460			
MAGANGUE- ESPERANZA	0.4824	-0.3589	-0.1330			0.0278
SAN ROQUE	0.1155	-0.1086				
BANCO EL	0.1491	-0.0423	-0.0565	-0.0956		0.0587
VARAS LAS	0.0765		-0.0876	-0.0174		0.0334
COQUERA LA- AUTOMAT		-0.0068		-0.0095		0.0138
BARRANCAB ERMEJA-AU	0.0057		-0.0159			
PTO BERRIO						
PTO SALGAR- AUTOM						
Intercept	-5.8231					



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 12: Coeficientes de regresión modelo T+3

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.6375	-0.4963		-0.1947		
PLATO	0.2257	-0.1577	-0.0670			
MAGANGUE- ESPERANZA	0.7596	-0.5917	-0.1957		0.0590	
SAN ROQUE	0.1815	-0.1779				
BANCO EL	0.3031	-0.2332		-0.1253		0.0826
VARAS LAS	0.1624	-0.0963	-0.0981			0.0424
COQUERA LA- AUTOMAT	0.0153	-0.0274		-0.0135		0.0236
BARRANCAB ERMEJA-AU	0.0239		-0.0352			
PTO BERRIO	0.0101	-0.0104				
PTO SALGAR- AUTOM						
Intercept	-10.1220					



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 13: Coeficientes de regresión modelo T+4

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.7625	-0.7301				-0.1186
PLATO	0.2787	-0.1950	-0.0818			
MAGANGUE- ESPERANZA	1.0141	-0.8044	-0.2291			0.0692
SAN ROQUE	0.2016	-0.1903				
BANCO EL	0.4014	-0.3225		-0.1318		0.0854
VARAS LAS	0.2162	-0.1584	-0.1014		0.0352	0.0245
COQUERA LA- AUTOMAT	0.0342	-0.0600				0.0314
BARRANCAB ERMEJA-AU	0.0555		-0.0531	-0.0186		
PTO BERRIO	0.0333	-0.0256				
PTO SALGAR- AUTOM	0.0096	-0.0176				
Intercept	-14.9600891					



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 14: Coeficientes de regresión modelo T+5

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.7875	-0.7950				-0.1105
PLATO	0.3138	-0.2179	-0.0937			
MAGANGUE- ESPERANZA	1.3103	-1.2447				
SAN ROQUE	0.2164	-0.2038				
BANCO EL	0.4776	-0.3860		-0.1461		0.0997
VARAS LAS	0.2465	-0.1891	-0.1047		0.0716	
COQUERA LA- AUTOMAT	0.0457	-0.0774				0.0406
BARRANCAB ERMEJA-AU	0.0870		-0.0774	-0.0244		
PTO BERRIO	0.0677	-0.0577				
PTO SALGAR- AUTOM	0.0152	-0.0276				
Intercept	-19.7169					



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 15: Coeficientes de regresión modelo T+6

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.7959	-0.8048				-0.1457
PLATO	0.3420	-0.3395				
MAGANGUE- ESPERANZA	1.5171	-1.4332				
SAN ROQUE	0.2280	-0.2113				
BANCO EL	0.5468	-0.4423		-0.1479		0.0982
VARAS LAS	0.2741	-0.2229	-0.0909		0.0742	
COQUERA LA- AUTOMAT	0.0531	-0.0874				0.0489
BARRANCAB ERMEJA-AU	0.1085		-0.0933	-0.0304		
PTO BERRIO	0.1049	-0.0920				
PTO SALGAR- AUTOM	0.0253	-0.0425				
Intercept	-24.04					



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 16: Coeficientes de regresión modelo T+7

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.7877	-0.8119				-0.1688
PLATO	0.3252	-0.3227				
MAGANGUE- ESPERANZA	1.7158	-1.6134				
SAN ROQUE	0.2145	-0.1925				
BANCO EL	0.6264	-0.5449		-0.1070		0.0881
VARAS LAS	0.2899	-0.2340	-0.0939		0.0842	
COQUERA LA- AUTOMAT	0.0597	-0.0929				0.0557
BARRANCAB ERMEJA-AU	0.1256		-0.1193			-0.0218
PTO BERRIO	0.1321	-0.1161				
PTO SALGAR- AUTOM	0.0394	-0.0628				
Intercept	-27.4806					



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 17: Coeficientes de regresión modelo T+8

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.7202	-0.8540			0.3213	-0.4186
PLATO	0.3010	-0.2986				
MAGANGUE- ESPERANZA	1.8923	-1.7732				
SAN ROQUE	0.2420	-0.2069				
BANCO EL	0.6529	-0.5866				
VARAS LAS	0.3203	-0.3123				0.0498
COQUERA LA- AUTOMAT	0.0665	-0.0948				0.0618
BARRANCAB ERMEJA-AU	0.1434		-0.1318			-0.0343
PTO BERRIO	0.1531	-0.1348				
PTO SALGAR- AUTOM	0.0467	-0.0771				
Intercept	-29.8764					



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 18: Coeficientes de regresión modelo T+9

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.5712	-0.5784				-0.2550
PLATO	0.2781	-0.2775				
MAGANGUE- ESPERANZA	2.0112	-1.8751				
SAN ROQUE	0.2796		-0.2571			
BANCO EL	0.6555	-0.6618				0.0859
VARAS LAS	0.3447	-0.3307				0.0544
COQUERA LA- AUTOMAT	0.0767	-0.0990				0.0641
BARRANCAB ERMEJA-AU	0.1390		-0.1324			
PTO BERRIO	0.1817	-0.1374			-0.0440	
PTO SALGAR- AUTOM	0.0494	-0.0878				
Intercept	-27.8290					



**PROYECTO:
Restauración del Sistema
del Canal del Dique**



Tabla 19: Coeficientes de regresión modelo T+10

	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
CALAMAR	1.4929	-0.4855				-0.3024
PLATO	0.2662	-0.2669				
MAGANGUE- ESPERANZA	2.1150	-1.9639				
SAN ROQUE	0.2973		-0.2690			
BANCO EL	0.6986	-0.7045				0.0885
VARAS LAS	0.3553	-0.3436				0.0662
COQUERA LA- AUTOMAT						0.0549
BARRANCAB ERMEJA-AU	0.1588		-0.1458			
PTO BERRIO	0.2072	-0.1655			-0.0459	
PTO SALGAR- AUTOM	0.0584	-0.1053				
Intercept	-26.9520					